



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo del río Ebro comprendido entre Castejón y Zaragoza

Treball realitzat per:
Jaume Reixach Escutia

Dirigit per:
Jose Dolz Ripollés

Grau en:
Enginyeria civil

Barcelona, Juny de 2014

Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.

TREBALL FINAL DE GRAU

RESUMEN

Título: Análisis de la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo del río Ebro comprendido entre Castejón y Zaragoza

Autor: Jaume Reixach Escutia

Tutor: Jose Dolz Ripollés

Palabras clave: transporte de sedimentos, río Ebro, propagación de avenidas, método de Muskingum.

El río Ebro, que transcurre desde la cordillera Cantábrica hasta su desembocadura en la costa del sur de Catalunya, es uno de los ríos más largos y caudalosos de la península Ibérica. En su tramo medio el río Ebro es en su gran mayoría un río meandriforme que además, es especialmente sensible a las inundaciones debido a su propia morfología y la del terreno, de manera que a lo largo del tiempo se han producido numerosas desbordamientos, generando graves daños en las localidades próximas al río en dicho tramo. Dentro del Ebro medio se encuentran las localidades de Castejón (Navarra) y Zaragoza, que albergan dos de las estaciones de aforo del río Ebro más antiguas. En los últimos años, se ha observado un aumento del nivel del fondo del río en dicho tramo, ocasionado por el desequilibrio en el transporte de sedimentos en el río que ha sido generado por las actuaciones en algunos de los afluentes que desembocan en puntos cercanos a Castejón.

Este estudio pretende analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo del río Ebro comprendido entre las localidades de Castejón y Zaragoza mediante varios parámetros representativos y examinar si se puede correlacionar dicha evolución temporal con la del estado del cauce en lo que al nivel del fondo del río se refiere.

La metodología seguida para poder llevar a cabo el objetivo del estudio consistirá en, en primer lugar, realizar el análisis de los datos que han sido registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza desde 1949 hasta la actualidad y, posteriormente, calcular los parámetros que servirán para estudiar la evolución temporal de la propagación de las avenidas y que corresponden a la velocidad y tiempo de propagación de las avenidas así como los parámetros K y X del método de propagación de crecidas de Muskingum.

A partir de los resultados extraídos de la comparación de las evoluciones en el tiempo de la forma en que se propagan las avenidas y el nivel del fondo del río, se podrá estudiar si el estado del cauce del río y, en consecuencia, el desequilibrio en el transporte de sedimentos, son elementos que afectan al modo en que se propagan las avenidas, incluyendo la magnitud de las inundaciones que éstas generan.

ABSTRACT

Title: Analysis of the temporal evolution of the propagation of floods in the Ebro river between Castejón and Zaragoza

Author: Jaume Reixach Escutia

Supervisor: Jose Dolz Ripollés

Keywords: sediment transport, Ebro River, flood routing, Muskingum method.

The river Ebro, which flows from the Cantabrian Mountain chain to its outlet on the southern coast of Catalonia, is one of the greatest and longest rivers in the Iberian Peninsula. In its middle stretch, the river Ebro is, mostly, a meandering river, especially susceptible to flooding because of its own morphology and terrain, which has turned out in numerous floods over time, generating severe damages to towns placed close to the river reach. The towns of Castejón (Navarra) and Zaragoza, which are placed within the middle stretch of the river Ebro, encompass two of the oldest gauging stations of the river Ebro. In recent years, there has been an increase of the level the bed of the river in that stretch, which has arisen from the imbalance in sediment transport in that stretch of the river Ebro, generated by the river works, carried out in some of the effluents that flow into the river Ebro nearby Castejón.

The main aim of this study is to analyze the temporal evolution of how floods spread in the stretch of the river Ebro Castejón-Zaragoza, by examining several representative parameters and, study if the temporal evolution of how floods spread can be related to the temporal evolution of the river bed level.

The methodology used to reach the objective of the this study consists on, once made the proper analysis of the data, which has been recorded in the gauging stations of Castejón and Zaragoza from 1949 until nowadays and finally, compute the parameters used to study the temporal evolution of the spreading of floods, which correspond to flood wave propagation celerity, the flood wave travel time and the parameters K and X of the flood routing method, the Muskingum method.

Once the results from comparing the temporal evolutions of how floods propagate and the river bed level are obtained, then it will be possible to analyze whether if the variations of the river bed level and, consequentially, the imbalance in sediment transport, are elements that affect to the way in which flood spreads, including the magnitude of them.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Josep Dolz, ya que sin su colaboración y contribución este trabajo no hubiera sido posible.

A César Ferrer, por su interés y dedicación.

A todo el equipo del SAIH Ebro, por la atención prestada.

A los profesores de la escuela, por su predisposición a ayudarme a realizar este trabajo.

A mis padres, por apoyarme y comprenderme.

A mis compañeros de promoción y amigos, por estar a mi lado en los momentos en los que los más necesarios eran.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO	3
2.1 Tramo Castejón-Zaragoza	4
2.2 Problemática del desequilibrio del transporte de sedimentos	7
2.3 Características de las avenidas	12
3. PROPAGACIÓN DE AVENIDAS	14
3.1 Método de Muskingum	15
3.1.1 Método de Muskingum-Cunge	21
3.2 Significado físico de los parámetros K y X	21
4. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS K Y X	24
4.1 Descripción de los datos disponibles para la realización del estudio	24
4.1.1 Curvas de gastos para las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza	25
4.1.2 Datos de las avenidas	27
4.2 Selección de avenidas para el estudio	29
4.3 Cálculo de los parámetros K y X para las avenidas seleccionadas	36
4.3.1 Avenida de junio de 1977	37
4.3.2 Avenida de abril de 1987	39
4.3.3 Avenida de abril de 1990	40
4.3.4 Avenida de marzo de 1991	41
4.3.5 Avenida de abril de 1991	42
4.3.6 Avenida de mayo de 1991	43
4.3.7 Avenida de diciembre de 1992	44
4.3.8 Avenida de diciembre de 1993	45
4.3.8 Avenida de enero de 1997	46
4.3.9 Avenida de febrero de 2003	47
4.3.10 Avenida de marzo de 2007	48
4.3.11 Avenida de junio de 2008	49
4.3.12 Avenida de febrero de 2009	50
4.3.13 Avenida de enero de 2010	51
4.3.14 Avenida de enero de 2013	52
4.3.15 Resumen de los parámetros de las avenidas	53
5. COMPROBACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.1 Previsión teórica de los resultados	54
5.2 Análisis de los resultados	57
5.2.1 Evolución temporal de la velocidad de propagación de las avenidas y los parámetros del método de Muskingum	67
6. CONCLUSIONES	83

7. BIBLIOGRAFIA.....	86
ANEXO A	89

Listado de tablas

Tabla 1: Tabla donde se muestra el código o nombre de cada curva de gastos de la estación de aforo de Castejón, juntamente con el período de validez de cada una.	26
Tabla 2: Tabla donde se muestra el código o nombre de cada curva de gastos de la estación de aforo de Zaragoza, juntamente con el período de validez de cada una.	26
Tabla 3: Tabla donde se muestran el caudal pico o máximo para las avenidas previamente seleccionadas. Se muestran en rojo las avenidas cuyo caudal máximo medido en Zaragoza es mayor que el caudal máximo medido en Castejón y por lo tanto, han sido descartadas para la realización del trabajo. También se muestran en verde las avenidas cuyo caudal máximo medido en Zaragoza es ligeramente menor al caudal máximo medido en Castejón y por lo tanto deben ser analizadas posteriormente de obtener los parámetros K y X.	34
Tabla 4: Tabla donde se muestran los datos utilizados para construir las curvas de gastos, para las estaciones de Zaragoza y Castejón, para la avenida de junio de 1977.	38
Tabla 5: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 1977.	38
Tabla 6: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1987.	39
Tabla 7: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1990.	40
Tabla 8: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de marzo de 1991.	41
Tabla 9: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1991.	42
Tabla 10: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de mayo de 1991.	43
Tabla 11: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de diciembre de 1992.	44
Tabla 12: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de diciembre de 1993.	45
Tabla 13: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de Enero de 1997.	46
Tabla 14: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2003.	47
Tabla 15: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2003.	48

Tabla 16: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 2008.....	49
Tabla 17: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2009.....	50
Tabla 18: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 2010.....	51
Tabla 19: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 2013.....	52
Tabla 20: Tabla donde se muestran los valores de los parámetros del método de Muskingum para las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro.....	53
Tabla 21: Tabla donde se muestran las avenidas seleccionadas para estudiar la relación entre el parámetro X del método de Muskingum y la laminación, mediante la reducción del caudal punta, correspondientes a las avenidas marcadas en rojo.....	67
Tabla 22: Tabla donde se muestra el caudal máximo mensual observado en el río Ebro en Miranda de Ebro, para las avenidas en las que se supera el caudal de 600 m ³ /s en su paso por Miranda de Ebro.	69

Tablas Anexo A

Tabla 1: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de junio de 1977.....	91
Tabla 2: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de junio de 1977, con los valores de la tabla siguiente.....	91
Tabla 3: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de junio de 1977.	92
Tabla 4: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de junio de 1987.....	94
Tabla 5: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de junio de 1987, con los valores de la tabla siguiente.....	95
Tabla 6: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para	

estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de junio de 1987.	95
Tabla 7: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de abril de 1990.	97
Tabla 8: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de abril de 1990, con los valores de la tabla siguiente.	97
Tabla 9: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de abril de 1990.	98
Tabla 10: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de marzo de 1991.	100
Tabla 11: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de marzo de 1991, con los valores de la tabla siguiente.	100
Tabla 12: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de marzo de 1991.	101
Tabla 13: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de abril de 1991.	103
Tabla 14: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de abril de 1991, con los valores de la tabla siguiente.	103
Tabla 15: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de abril de 1991.	104
Tabla 16: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de mayo de 1991.	106

Tabla 17: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de mayo de 1991, con los valores de la tabla siguiente.	106
Tabla 18: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de mayo de 1991.	107
Tabla 19: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de diciembre de 1992.....	109
Tabla 20: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de diciembre de 1992, con los valores de la tabla siguiente.	109
Tabla 21: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de diciembre de 1992.....	110
Tabla 22: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de diciembre de 1993.....	112
Tabla 23: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de diciembre de 1993, con los valores de la tabla siguiente.	112
Tabla 24: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de diciembre de 1993.....	113
Tabla 25: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de enero de 1997.....	115
Tabla 26: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de enero de 1997, con los valores de la tabla siguiente.	115
Tabla 27: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para	

estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de enero de 1997.....	116
Tabla 28: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de febrero de 2003.....	118
Tabla 29: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de febrero de 2003, con los valores de la tabla siguiente.....	118
Tabla 30: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de febrero de 2003.....	119
Tabla 31: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de marzo de 2007.....	121
Tabla 32: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de marzo de 2007, con los valores de la tabla siguiente.....	121
Tabla 33: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de marzo de 2007.....	122
Tabla 34: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de junio de 2008.....	124
Tabla 35: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de junio de 2008, con los valores de la tabla siguiente.....	124
Tabla 36: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de junio de 2008.....	125
Tabla 37: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de febrero de 2009.....	127

Tabla 38: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de febrero de 2009, con los valores de la tabla siguiente. 127

Tabla 39: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de febrero de 2009. 128

Tabla 40: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de enero de 2010. 130

Tabla 41: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de enero de 2010, con los valores de la tabla siguiente. 130

Tabla 42: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de enero de 2010. 131

Tabla 43: Tabla donde se muestran algunos datos de interés, incluyendo la fecha inicial y final de los datos disponibles de la avenida, el intervalo de tiempo entre cada registro del hidrograma y cuantos pares de valores (pares del caudal medido en las estaciones de Castejón y Zaragoza en un instante) de los hidrogramas se han utilizado para ajustar los parámetros, para la avenida de enero de 2013. 133

Tabla 44: Tabla donde se muestran los datos utilizados para obtener los parámetros del método de Muskingum, así como los valores del caudal en la estación de Zaragoza que se obtienen al propagar el hidrograma de la estación de Castejón, para la avenida de enero de 2013, con los valores de la tabla siguiente. 133

Tabla 45: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum resultantes del ajustes realizado con los datos de la tabla anterior así como los coeficientes que se utilizan en la ecuación 6 para estimar el valor del hidrograma en Zaragoza a partir del hidrograma en Castejón (hidrograma “propagado”) para la avenida de enero de 2013. 134

Listado de figuras

Figura 1: Imagen donde se muestra la cuenca hidrográfica y el recorrido del río Ebro dentro de la península ibérica (río principal dentro del área de color).	3
Figura 2: Plano de situación de las poblaciones de Castejón y Zaragoza, donde se encuentran las estaciones de aforo que definen el tramo de estudio del río Ebro.	5
Figura 3: Plano de situación de la estación de aforos de Castejón 9002.	6
Figura 4: Plano de situación de la estación de aforos de Zaragoza 9011.	6
Figura 5: Mapa del valle del Ebro donde se muestre la localización de los afluentes Arga, Aragón, Arba y Jalón junto con el embalse de Yesa.....	7
Figura 6: Imagen del ábaco que se utilizaba para predecir la altura que podía alcanzar el río en Zaragoza basándose en la comparación de las alturas registradas, desde la década de los 50, en las estaciones de aforo del río Ebro en Castejón y Zaragoza, donde cada punto negro representa una avenida.	8
Figura 7: Esquema explicativo de la analogía de la balanza de Lane.....	10
Figura 8: Figura donde se esquematiza el proceso de la laminación de una avenida, donde se produce una reducción del caudal pico (Attenuation of peak) además de aumentar la duración de la avenida (aumento de la magnitud de la base del hidrograma, que implica una mayor duración).....	14
Figura 9: ráficos donde se muestra la modificación del hidrograma de salida respecto el de entrada.....	17
Figura 10: Esquema del modelo de Muskingum en el cual se muestra el desglose del almacenamiento total en un almacenamiento de cuña y otro prismático.	17
Figura 11: Gráficas que muestran las curvas de lazo correspondientes a los diferentes valores de X. En este caso, observamos que el valor más óptimo de X sería 0,2.....	20
Figura 12: Gráfica que muestra la variación del parámetro K en función del caudal.....	22
Figura 13: Gráfico que representa las curvas de gastos 14, 15 y G (consecutivos en el tiempo) de la estación de aforos de Castejón y donde se observa que las variaciones entre ellas son prácticamente inapreciables.....	25
Figura 14: Limnigrama de la avenida de Enero de 2010 correspondiente al nivel del río observado a la estación de aforo del río Ebro en Zaragoza (9011).	27
Figura 15: Limnigrama registrado en papel, de la avenida de abril de 1991, correspondiente al nivel del río observado en la estación de aforo de Castejón (9002).	28
Figura 16: Gráfica que muestra los hidrogramas correspondientes a la avenida de enero de 2010, uno creado directamente a partir de los caudales proporcionados por el SAIH, y el segundo aplicando el cambio de curva de gastos correspondiente.....	29
Figura 17: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 1 de avenidas (1949-1987).....	31

Figura 18: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 2 de avenidas (1988-1991).....	31
Figura 19: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 3 de avenidas (1991-2003).....	32
Figura 20: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 4 de avenidas (2003-2009).....	32
Figura 21: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 5 de avenidas (2010-2013).....	33
Figura 22: hidrogramas observados en las estaciones de aforo de Castejón (9002) y Zaragoza (9011) correspondientes a la avenida de abril de 2007, donde se puede observar dos picos que preceden al pico absoluto y que podría modificar la morfología del cauce.	36
Figura 23: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de junio de 1977.	38
Figura 24: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1987.	39
Figura 25: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1990.	40
Figura 26: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de marzo de 1991.	41
Figura 27: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1991.	42
Figura 28: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de mayo de 1991.	43
Figura 29: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1992.	44
Figura 30: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1993.	45
Figura 31: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de enero de 1997.....	46

Figura 32: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de febrero de 2003.	47
Figura 33: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de marzo de 2007.	48
Figura 34: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de junio de 2008.	49
Figura 35: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de febrero de 2009.	50
Figura 36: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de enero de 2010.	51
Figura 37: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de enero de 2013.	52
Figura 38: Gráfico que muestra los caudales máximos medidos en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, juntamente con la línea de tendencia de los pares de caudales máximos.	57
Figura 39: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.	58
Figura 40: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación en función del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.	58
Figura 41: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.	59
Figura 42: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.	60

Figura 43: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos. 61

Figura 44: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida en función del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos. 61

Figura 45: Gráfico que muestra la variación de la reducción del caudal pico de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro..... 62

Figura 46: Gráfico que muestra la variación de la reducción del caudal pico de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables. 63

Figura 47: Gráfico que muestra la variación de la reducción del nivel del río pico de una avenida en función del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables. 63

Figura 48: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro..... 64

Figura 49: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables. 65

Figura 50: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función de la reducción de caudal máximo, a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro..... 65

Figura 51: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable..... 70

Figura 52: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río

Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	71
Figura 53: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	73
Figura 54: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	74
Figura 55: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del tiempo de propagación, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	76
Figura 56: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del tiempo de propagación, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	77
Figura 57: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del parámetro K del modelo de Muskingum, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	78
Figura 58: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del parámetro K del método de Muskingum, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	79
Figura 59: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.	81
Figura 60: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función de la reducción de caudal máximo a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.....	82

Figuras Anexo A

Figura 1: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de junio de 1977, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas. 91

Figura 2: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 1977, donde la gráfica para $X=0,42$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,4$ y $X=0,45$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado..... 93

Figura 3: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de febrero de 1987, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas que previamente fueron digitalizados. 94

Figura 4: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 1987, donde la gráfica para $X=0,2$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,15$ y $X=0,25$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 96

Figura 5: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de abril de 1990, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas que previamente fueron digitalizados. 97

Figura 6: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1990, donde la gráfica para $X=0,2$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,15$ y $X=0,25$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado..... 99

Figura 7: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de marzo de 1991, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas que previamente fueron digitalizados. 100

Figura 8: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de marzo de 1991, donde la gráfica para $X=0,36$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,3$ y $X=0,4$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado..... 102

Figura 9: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de abril de 1991, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas que previamente fueron digitalizados. 103

Figura 10: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1991, donde la gráfica para $X=0,42$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,4$ y $X=0,5$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 105

Figura 11: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de mayo de 1991, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas que previamente fueron digitalizados. 106

Figura 12: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de mayo de 1991, donde la gráfica para $X=0,2$ corresponde a la

- solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,15$ y $X=0,25$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 108
- Figura 13: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de diciembre de 1992, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas que previamente fueron digitalizados. 109
- Figura 14: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de diciembre de 1992, donde la gráfica para $X=0,17$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,1$ y $X=0,2$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 111
- Figura 15: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de diciembre de 1993, calculados a partir del limnigrama de dichas avenida. . 112
- Figura 16: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de diciembre de 1993, donde la gráfica para $X=0,11$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,05$ y $X=0,15$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 114
- Figura 17: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de enero de 1997, calculados a partir del limnigrama de dichas avenidas. 115
- Figura 18: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 1997, donde la gráfica para $X=0,11$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,05$ y $X=0,15$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 117
- Figura 19: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de febrero de 2003, que fueron proporcionados por el SAIH Ebro. 118
- Figura 20: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2003, donde la gráfica para $X=0,41$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,35$ y $X=0,45$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 120
- Figura 21: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de marzo de 2007, que fueron proporcionados por el SAIH Ebro. 121
- Figura 22: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de marzo de 2007, donde la gráfica para $X=0,16$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,1$ y $X=0,2$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 123
- Figura 23: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de junio de 2008, que fueron proporcionados por el SAIH Ebro. 124
- Figura 24: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 2008, donde la gráfica para $X=0,07$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0$ y $X=0,15$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 126
- Figura 25: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de febrero de 2009, que fueron proporcionados por el SAIH Ebro. 127

Figura 26: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2009, donde la gráfica para $X=0,42$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,4$ y $X=0,45$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 129

Figura 27: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de enero de 2010, que fueron proporcionados por el SAIH Ebro..... 130

Figura 28: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 2010, donde la gráfica para $X=0,42$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,4$ y $X=0,45$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 132

Figura 29: Gráfico que muestra los hidrogramas registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para la avenida de enero de 2013, que fueron proporcionados por el SAIH Ebro..... 133

Figura 30: Gráficos donde se muestran las curvas de lazo utilizadas para ajustar los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 2013, donde la gráfica para $X=0,43$ corresponde a la solución que mejor estima el hidrograma para la estación de Zaragoza, mientras que las curvas para $X=0,4$ y $X=0,45$ muestran las curvas de lazo para valores de X próximos al ajustado. 135

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

A lo largo de la historia, el tramo medio del río Ebro ha sido especialmente susceptible a las avenidas e inundaciones, siendo especialmente importante la de diciembre de 1960 donde se alcanzaron en Zaragoza los 4.150 m³/s y 6,32 metros, de manera que el cauce llegó en algunos puntos a 2,5 km de anchura, afectando gravemente a infraestructuras y defensas de muchas poblaciones de esta zona del río Ebro.

Se conoce como tramo medio del río Ebro, o Ebro medio, al trecho del río comprendido entre las localidades de Haro (La Rioja) y Mequinenza (Zaragoza, Aragón) que corresponde, en su gran mayoría, a un río meandriforme que transcurre por tierras llanas donde el cauce del río está pobremente encajado¹ en el terreno, lo que genera que este tramo sea especialmente sensible a inundaciones y modificaciones del cauce.

Este estudio analiza un tramo del Ebro medio, en concreto, el definido entre Castejón (Navarra) y Zaragoza (Zaragoza, Aragón), donde se sitúan dos de las estaciones de aforos que disponen de dos de las series históricas de mayor duración. Durante los últimos años, especialmente desde 1987 hasta la actualidad, se ha detectado que la relación entre el nivel del río máximo observado de cada avenida en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza (que se mantuvo estable desde que se tienen datos hasta 1987) ha ido variando.

En el informe llevado a cabo por el Área de Hidrología y Cauces de la Confederación Hidrográfica del Ebro, se atribuye el motivo de estas variaciones (variación de la relación entre el nivel del río máximo observado en ambas estaciones) a la modificación del nivel de fondo del río. Estas variaciones, asimismo, son el resultado del desequilibrio en el transporte de sedimentos que se viene dando en los últimos años en dicho tramo del río Ebro, consecuencia de las actuaciones llevadas a cabo en el río Arga que han generado que tanto el propio río Arga como el río Aragón, cuya confluencia con el río Ebro es cercana aguas arriba a la población de Castejón, aporten una cantidad de sedimentos muy por encima de la tónica de los últimos años.

Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio es, a partir de una serie de datos sobre las avenidas del río Ebro en el tramo de Castejón y Zaragoza desde 1949 hasta 2013, juntamente con la información sobre el estado del cauce del río durante estas avenidas, estudiar la evolución temporal del modo en que se propagan dichas avenidas, a través de una serie de parámetros representativos de éstas, y estudiar si dicha evolución temporal está correlacionada con la evolución temporal del estado del.

Para poder llegar a un resultado satisfactorio se deberá, en primer lugar, realizar un análisis de los datos que han sido registrados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para obtener los hidrogramas (variación del caudal observado en un punto con el tiempo) de ambas estaciones para cada una de las avenidas.

Una vez se disponga de los hidrogramas, se podrán calcular los parámetros representativos del modo en que se propaga cada avenida. Dos de estos parámetros corresponden a el tiempo y la velocidad de

¹ Colectivo de Educación Ambiental. El Ebro y sus riberas. Primera edición. Zaragoza. Ayuntamiento de Zaragoza. Página 26, 2000.

propagación de una avenida, que se obtiene casi directamente, y los otros dos son los parámetros K y X y se obtienen mediante un ajuste gráfico. El método de Muskingum consiste en un método de propagación de caudales utilizado para calcular el hidrograma en un cierto punto a partir del hidrograma en un punto aguas arriba. El parámetro K es interpretado como el tiempo de propagación de la avenida (aunque no tiene el mismo valor exactamente) y X está relacionado con la atenuación del caudal máximo de la avenida que se produce en el tramo de río que se estudia, de manera que el significado físico de estos parámetros justifican el hecho de ser utilizados como parámetros representativos de la propagación de las avenidas.

Finalmente, y después de haber estudiado cual ha sido la variación temporal del estado del cauce así como el efecto de los elementos susceptibles de modificar éste, se analizarán la variación temporal de los parámetros anteriormente descritos y se examinará si guarda alguna relación con la variación en el tiempo del estado del cauce, que se producirá para todos los parámetros excepto para el parámetro X, para el cual no se podrá extraer resultados concluyentes.

2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO

La cuenca del río Ebro (Figura 1), cuyo nombre proviene de la adaptación latina del término griego *íber*, que se cree que significaba ribera o margen del río, está habitada aproximadamente por 2.800.000 personas, está situada en la parte noreste de la Península Ibérica, donde incluye parte de la cordillera Cantábrica en el noroeste, la cordillera de los Pirineos en el norte, el sistema Ibérico al sur y el sistema Mediterráneo al este. La cuenca tiene una superficie total de 85.362 Km² y aunque la gran mayoría de la cuenca se encuentra en España, 445 Km² están en Andorra y 502 Km² en Francia. Por la cuenca transcurren un total de 12.000 km de cauce de los 347 ríos principales (Ebro incluido) englobados en la cuenca.

El cauce del río discurre completamente por España, desde su nacimiento en la Hermandad de Campoo de Suso, en la vertiente sur de la Cordillera Cantábrica hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo formando el delta del Ebro con una longitud total de 910 km². Es el río más caudaloso de España (de los ríos que discurren completamente por España), el segundo de la Península Ibérica detrás del Duero, además de ser el más largo entre los ríos que nacen y desembocan en territorio Español.

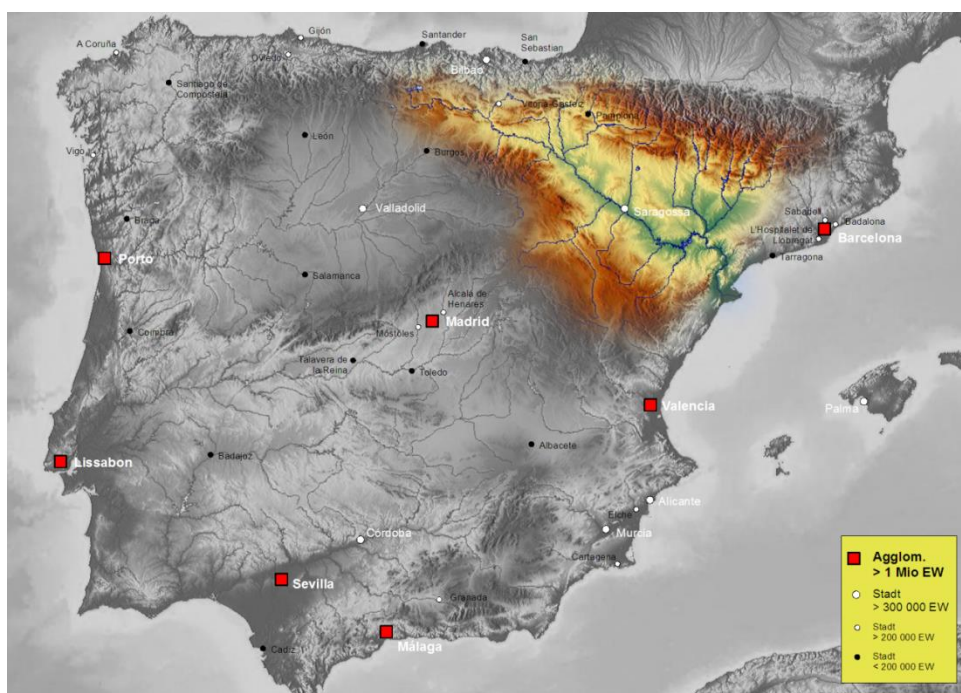


Figura 1: Imagen donde se muestra la cuenca hidrográfica y el recorrido del río Ebro dentro de la península ibérica (río principal dentro del área de color).

La Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE, es un organismo dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y sus funciones se pueden resumir en la gestión y regulación de las aguas de la cuenca hidrográfica del Ebro y riesgos que comportan las mismas. Dentro de la CHE está englobado el SAIH, "Servicio Automático de Información Hidrológica", que se encarga de proporcionar información en tiempo real de los aforos en río de varios puntos de la cuenca hidrográfica del Ebro, así como los niveles de los embalses o los registros de los pluviómetros entre otros. Esta red de información en tiempo real tiene como principales objetivos mejorar la previsión y la toma de decisiones en situación

² Confederación hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Descripción de la cuenca. (Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2001&idMenu=2004>)

de crecidas, con el fin de reducir los daños ocasionados por estas y globalizar la gestión de los recursos hidráulicos³.

El SAIH está formado por 58 estaciones en embalse, 148 estaciones de aforo en ríos, 226 estaciones de aforo en canales, 225 medidas de precipitación, 77 medidas de temperatura ambiente, 12 puntos de concentración y 100 estaciones repetidoras⁴. Dentro de estas 226 estaciones de aforo se encuentran las estaciones de aforo de Castejón / ESTACIÓN 9002: RIO EBRO EN CASTEJON⁵, y la de Zaragoza / ESTACIÓN 9011: RIO EBRO EN ZARAGOZA⁶. Destacamos precisamente estas dos estaciones ya que disponemos de un amplio conjunto de datos del caudal y el nivel del río Ebro en ambos puntos, durante un largo periodo de tiempo, y por tanto, definen el tramo del río Ebro objeto de análisis de este estudio.

2.1 Tramo Castejón-Zaragoza

Las poblaciones de Castejón, municipio de la Comunidad Foral de Navarra, y Zaragoza, capital de Aragón, se encuentran a una distancia de aproximadamente 100 km (Figura 2), y tienen en común que están situadas junto al cauce del río Ebro. En estos dos municipios, se encuentran dos estaciones de aforo, que tienen la particularidad de haber recogido datos del caudal durante un largo periodo de tiempo (en Castejón se tienen datos diarios desde 1929), y que utilizaremos para comprobar todas las hipótesis planteadas en relación al problema presente en el tramo de río Ebro definido por estas dos poblaciones.

En las proximidades de este tramo del río Ebro, con una longitud aproximada de 141.6 km (medida mediante el visor de mapas Google Earth), con las características de un río meandriforme bien definidas, y englobado en el tramo medio del río Ebro, desembocan varios importantes afluentes (Figura 5): el río Aragón, que tiene su confluencia con el río Ebro en las proximidades de Castejón (Figura 3), el río Arba, que tiene su confluencia con el Ebro en la zona intermedia del tramo Castejón-Zaragoza, y el río Jalón, cuya desembocadura con el río Ebro se sitúa aguas arriba de la estación de aforos de Zaragoza (Figura 4). Asimismo, el río Arga es un afluente del río Aragón, cuya confluencia se encuentra también bastante próxima a la confluencia del río Aragón con el Ebro. Estos dos ríos, especialmente el Arga, se han identificado como el origen del desequilibrio de sedimentos que en parte se trata en este estudio.

³ SAIH Ebro. Confederación Hidrográfica del Ebro. El SAIH Ebro. Introducción. (Disponible en: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/presentacion/introduccion>)

⁴ Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Descripción de la cuenca. Datos Básicos. (Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2745&idMenu=2167>)

⁵ Anuario de aforos. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Estaciones de aforo: Datos de estación foronómica Castejón. (Disponible en: <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9002>)

⁶ Anuario de aforos. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Estaciones de aforo: Datos de estación foronómica Zaragoza. (Disponible en: <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9011>)



Figura 2: Plano de situación de las poblaciones de Castejón y Zaragoza, donde se encuentran las estaciones de aforo que definen el tramo de estudio del río Ebro.





Figura 5: Mapa de la cuenca del Ebro donde se muestre la localización de los afluentes Arga, Aragón, Arba y Jalón junto con el embalse de Yesa.

2.2 Problemática del desequilibrio del transporte de sedimentos

El problema se detectó a partir de la observación de un ábaco que se utilizaba para predecir la altura que podía alcanzar el río en Zaragoza, basándose en la comparación de las alturas registradas desde la década de los 50, en las estaciones de aforo del río Ebro en Castejón y Zaragoza. En este ábaco, donde el eje horizontal corresponde a la graduación de alturas para los datos de la estación de aforo de Zaragoza, que no hayan experimentado variaciones en el tiempo en el tramo entre el Puente de Santiago y el Puente de Piedra. El eje vertical corresponde, en cambio, a la graduación de alturas para los datos de la estación de aforo de Castejón, de manera que cada punto representa una avenida (Figura 6). En el ábaco podemos observar que hay familias de puntos que se agrupan en líneas rectas, y que forman parte de un mismo período donde la relación de alturas en Zaragoza y Castejón se mantuvo estable.

Desde la década de los 50 hasta el año 1987, el ábaco se mantuvo estable (línea negra). A posteriori, las previsiones se empezaron a desviar fuera de los límites aceptables, incrementándose esta deriva progresivamente hasta hoy en día, observándose la máxima variación en la línea verde, que corresponde al período entre 2010 y 2013. Estas variaciones en las predicciones, significando que para valores estables de avenidas en Zaragoza, se observan variaciones para las correspondientes avenidas en Castejón y otros puntos observados, que además, fueron comprobadas mediante fotografía aérea, llevaron al Área de Hidrología y Cauces de la Confederación Hidrográfica del Ebro a realizar un estudio el año 2013 de las posibles causas así como varias soluciones al problema, denominado "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón".

En este estudio, se atribuyen estas alteraciones de las predicciones a modificaciones en el cauce que hacen circular las avenidas con más nivel, concretamente, estas modificaciones nacen como consecuencia de un desequilibrio en el transporte de sedimentos, o bien por una mayor aportación de áridos y gravas aguas arriba, o por un menor transporte hacia aguas abajo.

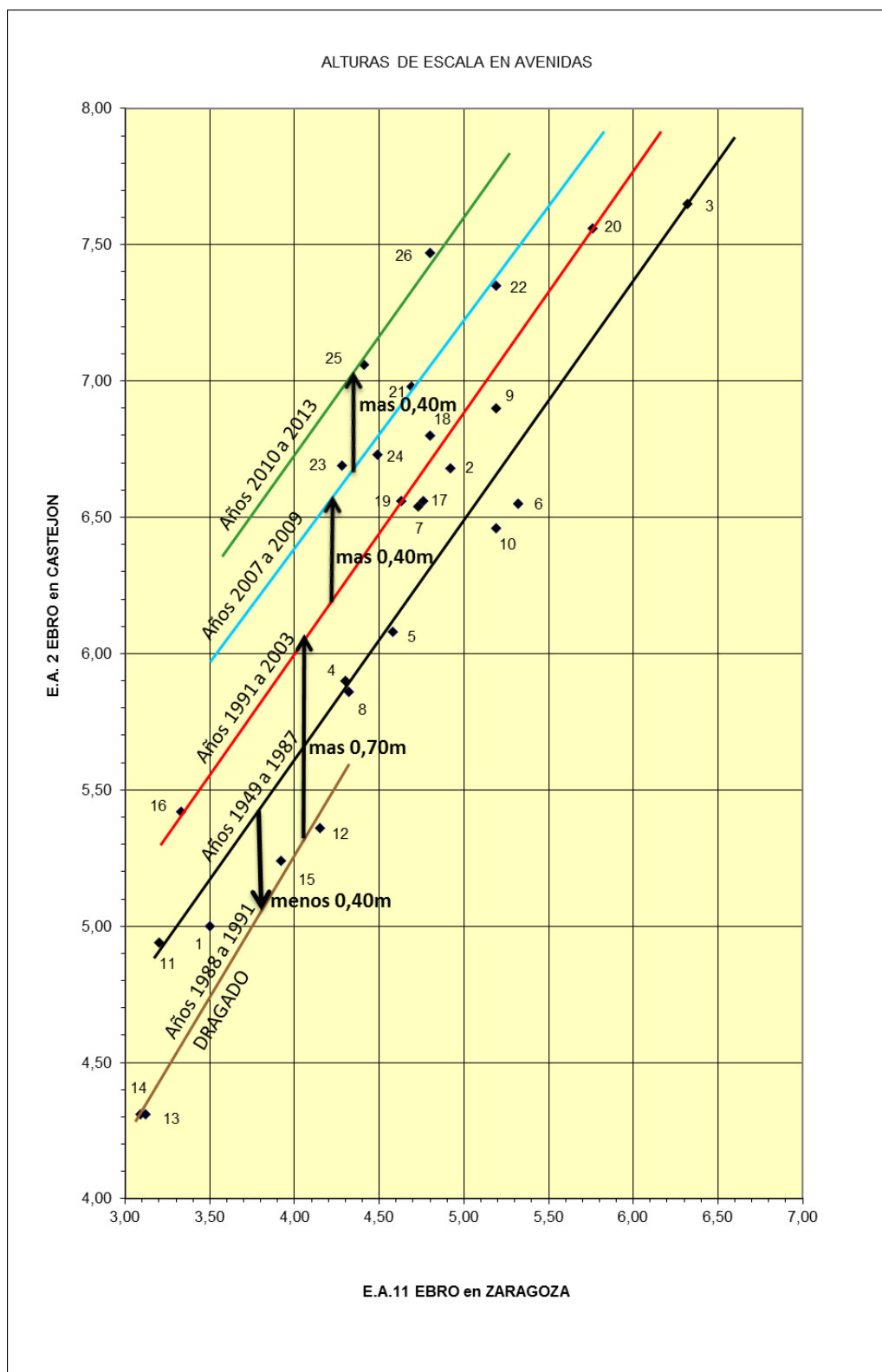


Figura 6: Imagen del ábaco que se utilizaba para predecir la altura que podía alcanzar el río en Zaragoza basándose en la comparación de las alturas registradas, desde la década de los 50, en las estaciones de aforo del río Ebro en Castejón y Zaragoza, donde cada punto negro representa una avenida.

Para estudiar y analizar por qué se produce un desequilibrio de transportes de sedimentos se utilizará la analogía de la balanza de Lane. La analogía de la balanza de Lane propone un modelo que analiza si el fondo de un río se encuentra en equilibrio en presencia de transporte de sedimentos, que se produce cuando no varía el perfil de éste⁷. Este equilibrio es consecuencia de un equilibrio de acciones o de un conjunto de variables, de las cuales Lane consideró principalmente 4: El caudal líquido unitario q (que es el caudal por metro de ancho), el caudal sólido (caudal de sedimento sólido) unitario que se mueve por el fondo q_s , la pendiente i , y el tamaño del sedimento D . La analogía se da al considerar que los pesos de las balanzas son los caudales y que los brazos de la balanza corresponden al pendiente y el tamaño del sedimento (Figura 7).

El brazo derecho de la balanza, donde el brazo representa el pendiente y el peso el caudal unitario, tiene un momento $q \cdot i$ mientras que el otro brazo tiene un momento $q_s \cdot D$, de manera que el equilibrio consiste en compensar ambos momentos. En el caso que el momento del brazo derecho $q \cdot i$ sea mayor que $q_s \cdot D$, se producirá una incisión del fondo (profundización del cauce del río debido a la erosión), mientras que si el momento del brazo izquierdo $q_s \cdot D$ es mayor que $q \cdot i$ se producirá una acreción, donde se aumenta la cota de fondo del río debido a la sedimentación y que precisamente, es el caso que se produce en el tramo de estudio del río Ebro.

Dentro de todas las posibles actuaciones o infraestructuras que indirectamente pueden comportar un desequilibrio en el transporte de sedimentos, en nuestro caso nos centraremos en las obras de encauzamientos de motas y cortas, además del efecto de laminación que comportan los embalses, o el efecto que pueden tener la construcción de una estructura de pasos sobre el río.

Las obras de encauzamiento o encauzamientos, son actuaciones que consisten en arreglar o modificar un tramo del cauce de un río. Puede tener varios objetivos entre los que se incluyen la protección del territorio frente a las inundaciones, la protección de los márgenes de los ríos que se centra en especialmente preservar los límites del cauce, la fijación de un cauce estable para el río, la mejora de las condiciones de desagüe, generalmente la capacidad de desagüe, la creación o consolidación de un canal navegable y la recuperación de los espacios naturales y recreativos de un río (Martín Vide, 2002).

Un río meandriforme cubre la distancia entre dos puntos, con un recorrido de mayor longitud que el que tendría un río menos curvilíneo y por lo tanto, también tiene una pendiente menor. Si consideramos que el caudal que puede albergar una sección del cauce de un río es menor al disminuir la pendiente, el caudal que puede circular por un río meandriforme será menor, traduciéndose en una menor capacidad de desagüe, aumentado el peligro y la frecuencia de desbordamiento e inundación.

⁷ MARTÍN VIDE, J. P. Ingeniería de ríos. Barcelona. Edicions UPC. 2002.

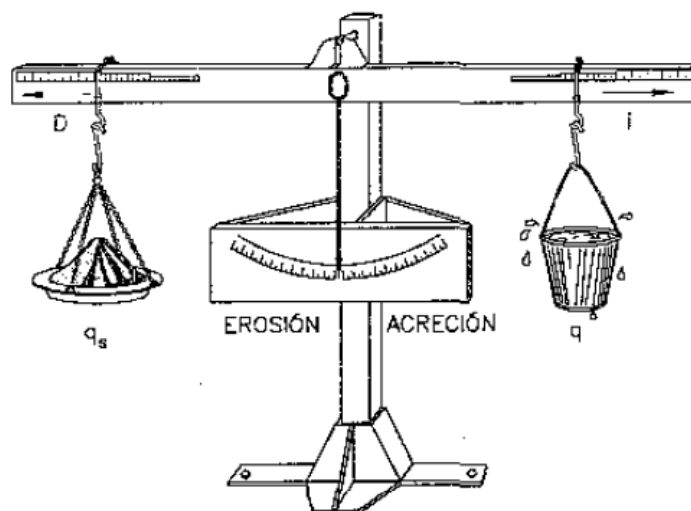


Figura 7: Esquema explicativo de la analogía de la balanza de Lane.

Las cortas son un tipo de obra de encauzamiento que tratan de solucionar los problemas que comportan los ríos de gran sinuosidad o meandriformes, rectificando el cauce del río mediante un tramo de cauce artificial más rectilíneo (aunque no completamente, el nuevo cauce debe seguir una alineación curva, pero menos curvilínea que la del cauce original) lo que conlleva una disminución de la longitud y por consiguiente, un aumento del pendiente.

A partir de la analogía de la balanza de Lane, observamos que pasamos del equilibrio del cauce original a una situación de desequilibrio, donde en este caso el momento del brazo derecho de la balanza $q \cdot i$ es mayor que $q_s \cdot D$, al haber aumentado la pendiente i y manteniéndose los otros parámetros constantes lo que ocasiona, un descenso de fondo producido por la erosión. Generalmente la erosión se propaga aguas arriba desde el extremo superior del encauzamiento lo que también produce el aumento del transporte de sedimento sólido aguas abajo del tramo de río que se ha visto modificado.

Las motas son un tipo de estructura, muy parecida a un dique, utilizada para proteger las áreas cercanas al cauce de un río de las inundaciones y como consecuencia, evitar los costes económicos que estas conllevan cuando se producen crecidas del nivel del río que provocan desbordamientos. Cuando el caudal que circula por un río es demasiado alto y por lo tanto desborda, una parte del caudal sigue circulando por el cauce mientras que la parte restante discurre por las llanuras de inundación. Sin embargo, cuando se construyen motas para defender el territorio frente inundaciones, especialmente cuando las motas se construyen muy próximas a los márgenes del cauce del río, el porcentaje de caudal que antes discurría por las llanuras de inundación, pasa a circular (quizás no todo, pero si en gran medida) por el cauce del río.

En la situación inicial de desbordamiento e inundación se cumple el equilibrio en el transporte de sedimentos, sin embargo, en la segunda situación donde se considera el efecto de las motas construidas, observamos que el caudal que circula por el cauce es mayor (el caudal que circula por las llanuras de inundación no se considera a efectos del equilibrio de transporte de sedimentos) de manera que al igual que con las cortas, el momento del brazo derecho de la balanza $q \cdot i$ es mayor que $q_s \cdot D$, al haber

aumentado la pendiente i y manteniéndose los otros parámetros constantes, lo que ocasiona un descenso de fondo producido por la erosión.

La laminación de avenidas es un fenómeno natural que se produce tanto en ríos (sobre todo en las crecidas, cuando el río desborda y ocupa la llanura de inundación) como en embalses y que consiste en una reducción del caudal máximo de una avenida así como un aumento del caudal mínimo, y por lo tanto, en una atenuación de los valores extremos (máximo y mínimo) hacia el valor medio a medida que la avenida discurre aguas abajo, en el caso de un río, o una vez que el agua de la avenida es evacuada por la presa. En concreto, la presa atenúa los efectos de la avenida, ya que el caudal evacuado siempre es menor que el caudal que llega de manera que para un hidrograma determinado, la laminación será mayor cuanto mayor sea la superficie del embalse⁸ y ,por lo tanto, el efecto laminador en embalses muy pequeños puede llegar a ser de poca importancia.

La laminación, por consiguiente, disminuye los caudales máximos haciendo reducir el poder transportador del agua y evita inundaciones que depositan los sedimentos en la llanura de inundación. Sin embargo, hay que considerar que el agua que es evacuada por la presa es agua limpia libre de arrastres y por lo tanto, para poder compensar su poder transportador erosiona el cauce del río aguas abajo, de manera que la reducción del poder transportador debida a la reducción de los caudales de mayor valor, viene compensada por el poder erosionador que tienen las aguas que no transportan sedimentos de fondo.

En algunos casos, cuando se construye una estructura de paso sobre un río, puede darse la situación que se disminuya la sección del río produciendo una reducción aguas arriba de la velocidad del agua y en consecuencia una pérdida de poder transportador de sedimentos. Sin embargo, el efecto que tiene una estructura de paso de estas características es mucho más localizado, a diferencia de lo que se puede observar en nuestro caso, donde el aumento de nivel de fondo se produce en el tramo del río Ebro entre Castejón y Zaragoza y por lo tanto, podemos descartar este tipo de estructura como causante principal del aumento del nivel de fondo del tramo de estudio.

Una vez explicada la funcionalidad y/o el efecto que tienen sobre el equilibrio del transporte de sedimentos las estructuras o actuaciones anteriores, debemos analizar en qué medida afectan a los dos ríos que se identifican como causantes del aumento del nivel de fondo en el río Ebro, así como el propio río Ebro.

En primer lugar, encontramos tanto cortas como motas en el río Arga, además, éste no dispone de prácticamente ninguna regulación. Ambas actuaciones tienen como consecuencia la incisión o erosión del cauce, produciéndose un descenso del nivel del fondo del cauce. Además, encontramos motas en la unión con el río Aragón y con el río Ebro, que acarrear incisiones en los ríos Aragón y Ebro para igualar los niveles de fondo entre el río Arga y ambos ríos. Sin embargo, cuando analizamos el río Ebro, se concluye que la aportación de sedimentos por encima de lo normal de los ríos Arga y Aragón, consecuencia de las incisiones que sufren los fondos de ambos ríos, compensa y supera la propia incisión del río Ebro⁹.

Finalmente, nos encontramos que en el río Ebro se dio una situación de desequilibrio de transporte de sedimentos, donde $q_s \cdot D$ es mayor que $q \cdot i$ debido al aumento de q_s generado por la aportación extraordinaria de sedimentos. Esto generó una sedimentación, de manera que la deposición de

⁸ VALLARINO, E. Tratado básico de presas. Cuarta Edición. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1998.

⁹ FERRER CASTILLO, C. Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón. Zaragoza. Área de Hidrología y Cauces, Confederación Hidrográfica del Ebro. 2013.

sedimentos ocasionó, entre otras cosas, un incremento de la cota del fondo del río, y que propició un aumento del nivel del río para un mismo caudal, aumentando el riesgo de inundación.

En el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón" se describe cual es la variación en el estado del cauce del río a lo largo del tiempo, que además queda expuesto en el ábaco (Figura 6).

Inicialmente, en el verano de 1987 se observó acumulaciones de grava en el cauce del río Ebro en la zona de Castejón, por lo que dicho tramo de río fue dragado, produciendo un descenso del nivel de las avenidas de 0,50 metros (línea marrón del ábaco). Esta situación se mantuvo hasta la avenida de mayo de 1991, donde se produjo un aumento del nivel de la avenida de 0,7 metros y de aproximadamente 0.4 metros respecto la situación inicial previa al dragado.

Esta tónica se reprodujo en la mayoría de las avenidas que la siguieron (línea roja del ábaco), hasta 2007, donde se observó otro ascenso de 0,4 metros (línea verde del ábaco). Finalmente, en 2010 se produjo otro aumento de 0,4 metros más, que perduró hasta 2013, línea verde del ábaco, cuando se realizó el informe. Finalmente, en comparación con la situación de 1987 previa al dragado, se produjo un aumento del nivel de avenidas de más de un metro.

2.3 Características de las avenidas

Cuando se produce una avenida en el río Ebro, los afluentes del margen izquierdo del río (es decir, los que se encuentran en la vertiente norte del río, correspondiente a ríos cuyas cuencas se encuentran en los Pirineos) tienen una mayor importancia, de manera que tanto el Arga como el Aragón tienen un papel muy significativo juntamente con otros afluentes del margen izquierdo como el Ega o el Zadorra en detrimento de los del margen derecho¹⁰, como por ejemplo el Jalón.

Esta situación, se pone de manifiesto en el dicho:

*"Ega, Arga y Aragón hacen al Ebro varón"*¹¹

que se refiere al hecho de que el Ebro es un río poco caudaloso hasta la confluencia con estos ríos, todo afluentes del margen izquierdo. Esta característica de la cuenca del río Ebro nos permite pensar que cuando se produce una avenida en el río Ebro también circulará un caudal alto, aportador de sedimentos, por el Arga y el Aragón, de manera que habrá una deposición de sedimentos.

Sin embargo y aunque muy raramente, también se puede dar la situación de que la avenida esté originada en su mayoría por lluvias en la cordillera Cantábrica. En dicho caso, la avenida circulará más limpia, transportando una menor cantidad de sedimentos (al reducirse la aportación del Arga y el Aragón) de manera que es posible que "limpie" el cauce, retirando una parte de los sedimentos depositados por las avenidas anteriores.

¹⁰ Colectivo de Educación Ambiental. El Ebro y sus riberas. Primera edición. Zaragoza. Ayuntamiento de Zaragoza. Página 10, 2000.

¹¹ Gran Enciclopedia Aragonesa. El periódico de Aragón. Refranes geográficos. (Disponible en: http://www.encyclopedia-aragonesa.com/voz.asp?voz_id=10722)

Por lo tanto, deberán analizarse en los anuarios que avenidas tienen su origen aguas arriba de la confluencia del Ebro con el río Aragón a partir de los datos recogidos en los anuarios, ya que dichas avenidas son susceptibles de cambiar el estado del cauce del río.

En el tramo definido por las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza, a parte del Aragón, del cual el Arga es afluente, sólo existe otro afluente del margen izquierdo de cierta importancia, el Arba, que de todos modos, su aportación media anual¹² desde 2000 hasta 2010 se encuentra sobre los 230 hm³ frente los aproximadamente 2.000 hm³ que aportan anualmente en conjunto el Aragón y el Arga.

Si a ésto le sumamos el hecho que los afluentes del margen derecho tienen una importancia bastante menor, por ejemplo, a pesar de ser el Jalón uno de los afluentes del margen más importante dentro del tramo solo tiene una aportación anual de aproximadamente 100 hm³ nos permite pensar que en caso de avenidas, la mayor parte de caudal circulante en el tramo entre las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza tendrá como origen los ríos Arga y Aragón. Esto se pone de manifiesto en el hecho que, en el régimen natural, sin extracciones del río para el consumo, se estima que la aportación anual¹³ en la estación de Castejón sería 8.945 hm³/año mientras que en Zaragoza equivaldría a 9.808 hm³/año, lo que supone una diferencia de apenas 860 hm³.

¹² Todas las aportaciones anuales que se muestran en este apartado se han calculado a partir de los datos oficiales del anuario de aforos del Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente de los últimos 10 años hidrológicos de los cuales se disponen de datos, desde 2000 hasta 2010. En particular, se han utilizado los datos de la estación de aforos del río Arba 9060 en Gallur, estación de aforos del río Aragón 9005 en Caparroso, estación de aforos del río Arga 9004 en Funes, ambas aguas arriba de la confluencia de ambos ríos y estación de aforos del río Jalón 9087 en Grisén. Los datos de estas estaciones están disponibles en: <http://sig.magrama.es/aforos/>

¹³ Confederación Hidrográfica del Ebro. Plan hidrológico del eje del río Ebro desde Miranda de Ebro hasta la cola del embalse de Mequinenza. Borrador. Madrid. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2008.

3. PROPAGACIÓN DE AVENIDAS

Se conoce como avenida o crecida a un caudal alto de un río superior a un valor medio o aceptable del flujo de un río, que generalmente está asociada a un desborde del río del cauce principal invadiendo las áreas adyacentes, conocidas como llanuras de inundación¹⁴.

Aunque una avenida se puede generar por diferentes motivos, como por ejemplo la rotura de una presa que aporta súbitamente una gran cantidad de agua, el deshielo de nieve en el cambio de estación o bien la caída de escombros o bloques de hielo que bloquean el cauce principal y obligan al río a desbordarse e inundar las zonas colindantes¹⁵, generalmente son consecuencia de precipitaciones de larga duración o bien, precipitaciones más cortas pero de gran intensidad, de manera que la duración y la intensidad de las precipitaciones son unos de los factores más importantes a la hora de determinar la magnitud y peligrosidad de una avenida y la posibilidad de que resulte en una inundación.

Las avenidas circulan por el cauce del río cambiando constantemente de forma gradual sus propiedades, como su velocidad y su calado. En particular, y teniendo en cuenta que el sistema se encuentra en equilibrio, sin nuevas aportaciones, la avenida tiende, a medida que se propaga aguas abajo, a atenuar su caudal y calado máximo aumentando su duración. Este fenómeno se conoce como **laminación de una avenida** (Figura 8).

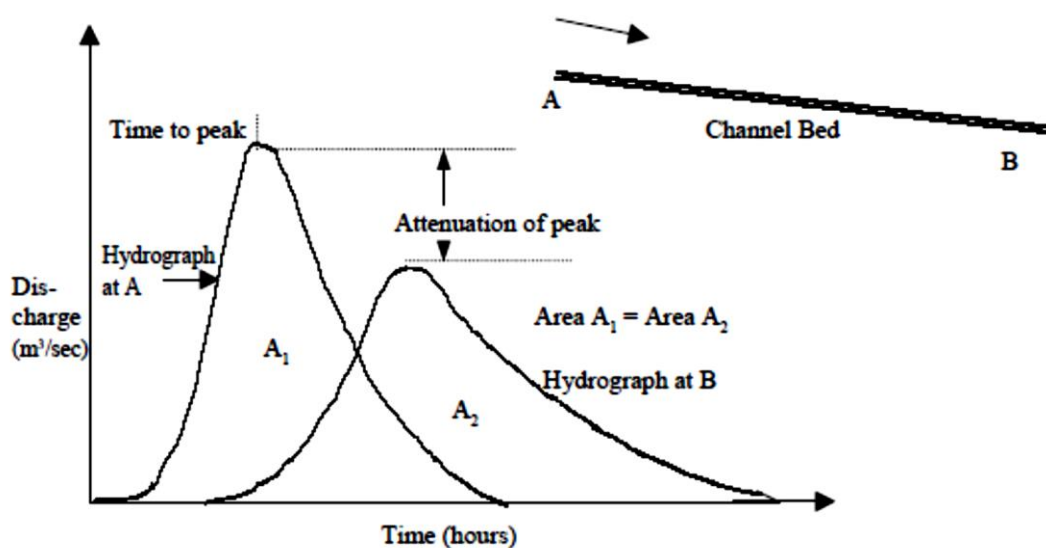


Figura 8: Figura donde se esquematiza el proceso de la laminación de una avenida, donde se produce una reducción del caudal pico (Attenuation of peak) además de aumentar la duración de la avenida (aumento de la magnitud de la base del hidrograma, que implica una mayor duración).

La laminación de una avenida en un tramo de un río, resulta del almacenamiento de agua en dicho tramo, específicamente, en la zona inundada contigua al cauce principal: las zonas de que se inundan cuando una avenida desborda oponen una mayor resistencia al flujo que el cauce principal, ya que, a diferencia de

¹⁴ BEDIENT, B.P.; W.C. HUBER; B.E. VIEUX. Hydrology and floodplain analysis. Cuarta edición. Upper Saddle River, NJ, EEUU. Prentice Hall. 2008.

¹⁵ US Geological Survey. Frequently Asked Questions - The Hydrology of Floods. (Disponible en: md.water.usgs.gov/faq/floods.html)

éste, no están sometidas al flujo del agua regularmente, lo que produce que tengan una mayor rugosidad y sean más irregulares (al no ser “escarbadadas” regularmente por el flujo del río).

El hecho de que las zonas inundables colindantes al cauce principal tengan unas características diferentes hace que aumente la resistencia al flujo de agua, generando una diferencia entre el flujo en el cauce principal y el flujo en dichas zonas, de forma que se reduce la velocidad de propagación de la avenida (al haber una parte del caudal sometida a una mayor resistencia al flujo que la que experimenta el flujo del cauce principal) y propicia el almacenamiento de agua en dichas zonas. Este almacenamiento es mayor para avenidas con desbordamientos más pequeños, de manera que el porcentaje del flujo que circula por las zonas de inundación es muy pequeño. Cuando el desbordamiento es mayor, aumenta el calado de las zonas inundables así como el caudal que circula por ellas, de manera que progresivamente deja de comportarse como almacenamiento para tener las mismas características hidráulicas que el cauce principal¹⁶.

Aunque es muy complicado estimar cuando y que magnitud tendrá una avenida o inundación, es posible pronosticar como se propagará la onda de la avenida a través de un tramo de un río mediante diferentes procedimientos, agrupados bajo el nombre de **propagación de avenidas o caudales**, siendo de gran utilidad para los sistemas de alerta de inundación.

Los métodos de propagación de avenidas permiten obtener el hidrograma (valor del caudal en un punto a lo largo del tiempo) a partir del hidrograma de un punto aguas arriba y en particular, nos permitirá obtener el valor del caudal pico o máximo (cuál será el valor del caudal más elevado) y cuánto tiempo tardará el pico de la avenida en propagarse desde el punto aguas arriba (para el cual se conoce el hidrograma) hasta el punto en concreto para el cual se desea conocerlo.

Los métodos de propagación de avenidas se dividen entre métodos hidrológicos y métodos hidráulicos. Los primeros se derivan a partir de la ecuación de continuidad y almacenamiento y utilizan un conjunto de datos históricos para hacer predicciones, mientras que los segundos, que son más precisos que los primeros, se basan en la solución de la ecuación de continuidad y la ecuación de momentos o dinámicas, conocidas como ecuaciones de Saint Venant, para flujo no permanente en lámina libre. Además, los métodos hidráulicos, en vez de utilizar datos históricos para realizar predicciones utilizan las propiedades hidráulicas del flujo y del cauce (BEDIENT, 2008).

3.1 Método de Muskingum

El método de Muskingum es un método hidrológico aproximado de **propagación de caudales** para calcular el hidrograma de caudales en un cierto punto de un río, conocido el hidrograma en un punto aguas arriba¹⁷. El método de Muskingum fue desarrollado por McCarthy¹⁸ en 1938 durante la realización del control de inundaciones del río Muskingum en Ohio, Estados Unidos.

¹⁶ DOLZ RIPOLLÉS, J. Propagación de avenidas. Métodos de cálculo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya.

¹⁷ NANÍA ESCOBAR, L.S. Ingeniería Hidrológica. Segunda edición. Granada, España. Grupo Editorial Universitario. 2006.

¹⁸ PERUMAL, M. A historical perspective of the muskingum method interpretations. Florisa Melone Memorial Conference. IRPI. 2013.

El método se basa en el desarrollo de la ecuación de continuidad de una cuenca (Ecuación 1) y consiste (generalmente) en obtener los valores de los caudales de salida $Q(t)$ de un punto (punto de salida) a partir del hidrograma de entrada $I(t)$ (punto de entrada), que corresponde al hidrograma del punto aguas arriba. La forma del hidrograma varía a medida que nos desplazamos aguas abajo como se ha explicado anteriormente como consecuencia de la laminación, produciéndose una atenuación del caudal y calado del pico de la avenida.

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

Ecuación 1

En un canal prismático en condiciones ideales, la translación del hidrograma sería la única diferencia entre ambos hidrogramas, sin embargo, hay que tener en cuenta el efecto que tiene el almacenaje del agua en el cauce del tramo del río definido por los puntos cuyos hidrogramas estamos comparando. Los efectos de este almacenaje corresponden a la reducción del valor del caudal máximo (generalmente el fenómeno por el cual a medida que una avenida avanza aguas abajo los caudales extremos se reducen se conoce como laminación de avenidas) o atenuación, aumenta la duración de la avenida y se retrasa el instante en el cual se produce el caudal pico o máximo.

El tiempo de propagación de la avenida, que se puede calcular como el intervalo de tiempo entre los caudales pico de ambos hidrogramas (el de aguas arriba y el propagado) y que resulta de la suma del tiempo de translación, que corresponde al tiempo que requiere la avenida para trasladarse entre los puntos de entrada y salida, y el tiempo de redistribución, que es el tiempo que se retrasa el pico de la avenida debido a la laminación (aumento de la duración de la avenida) ¹⁹ (Figura 9).

Para poder calcular el valor de $Q(t)$ en el método de Muskingum (en su modelo lineal y más simple, ya que también existe el modelo no-lineal) debe definirse la función del volumen almacenado, que generalmente se considera una función que depende de los caudales de entrada y salida así como sus derivadas temporales, como una función lineal de los caudales de entrada y salida. En concreto, el método de Muskingum describe el volumen total almacenado como la suma de un almacenamiento prismático y otro de almacenamiento por cuña (Figura 10).

El almacenamiento prismático es proporcional al caudal de salida $Q(t)$ mientras que el caudal de cuña es proporcional a la diferencia entre el caudal de entrada y salida $I(t) - Q(t)$ y se expresan respectivamente mediante las fórmulas:

$$S_p = KQ$$

Ecuación 2

$$S_c = KX(I - Q)$$

Ecuación 3

de manera que el almacenamiento total se expresa como:

$$S = S_p + S_c = KQ + KX(I - Q)$$

Ecuación 4

¹⁹ CHOW, V.T.; D.R. MAIDMENT; L.W. MAYS. Applied hydrology. Primera edición. McGraw-Hill. 1988.

Donde los parámetros K y X , cuyo significado físico y relación con las propiedades del cauce del río y la avenida se explican posteriormente, son respectivamente un coeficiente de proporcionalidad que suele estar cercano al valor del tiempo de propagación de la onda de avenida en el tramo de estudio y un factor de ponderación que señala la importancia de la diferencia entre caudales de entrada y salida en el almacenamiento con un valor que generalmente se encuentra entre 0 y 0,5.

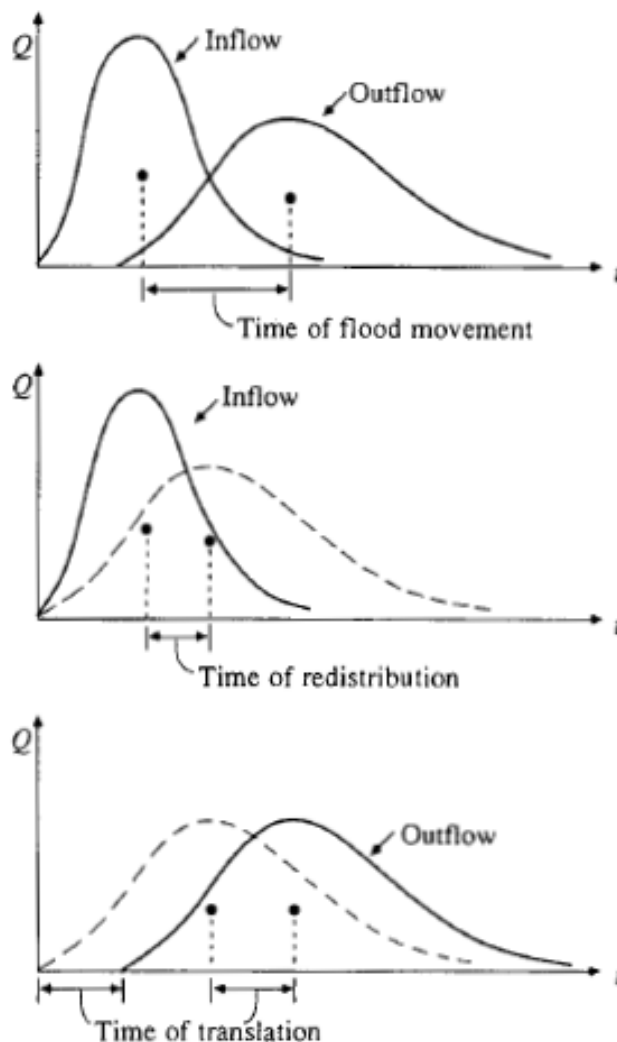


Figura 9: gráficos donde se muestra la modificación del hidrograma de salida respecto el de entrada.

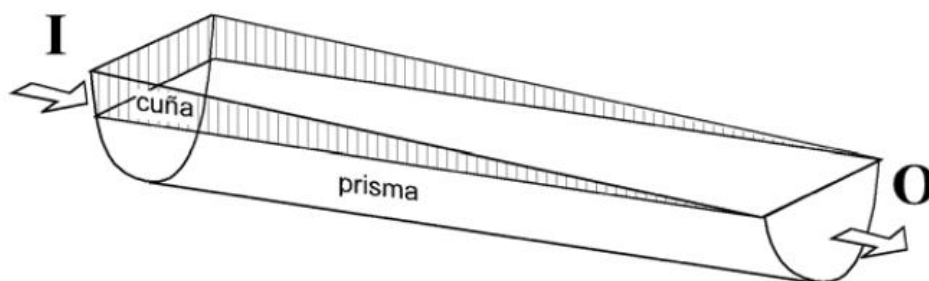


Figura 10: Esquema del modelo de Muskingum en el cual se muestra el desglose del almacenamiento total en un almacenamiento de cuña y otro prismático.

Si consideramos dos instantes de tiempo 1 y 2, entre los cuales hay un intervalo de tiempo Δt , y los volúmenes almacenados por el cauce del río en dichos instantes S_1 y S_2 , la variación de volumen que se ha producido en la cuenca o tramo de estudio es la diferencia entre S_2 y S_1 . Esta diferencia de volumen almacenado se puede calcular directamente como la diferencia de las expresiones del volumen almacenado en un tramo evaluado en los instantes 1 y 2 pero también como la diferencia entre los caudales promedios de entrada y salida entre los instantes 1 y 2, multiplicado por el intervalo de tiempo Δt :

$$S_2 - S_1 = KQ_2 + KX(I_2 - Q_2) - (KQ_1 + KX(I_1 - Q_1)) = \Delta t \cdot \left(\frac{I_2 + I_1}{2} - \frac{Q_2 + Q_1}{2} \right)$$

Ecuación 5

Desarrollando la igualdad anterior se obtiene finalmente una expresión de Q_2 que depende únicamente de I_2 , I_1 y Q_1 :

$$\begin{aligned} KQ_2 + KX(I_2 - Q_2) - (KQ_1 + KX(I_1 - Q_1)) &= \Delta t \cdot \left(\frac{I_2 + I_1}{2} - \frac{Q_2 + Q_1}{2} \right) \rightarrow \\ \rightarrow KQ_2 - KXQ_2 + KXI_2 - (KQ_1 + KX(I_1 - Q_1)) &= \Delta t \left(\frac{I_2 + I_1}{2} - \frac{Q_1}{2} \right) - \Delta t \frac{Q_2}{2} \rightarrow \\ \rightarrow K(1 - X)Q_2 + \frac{\Delta t}{2} Q_2 &= I_1 \left(KX + \frac{\Delta t}{2} \right) + I_2 \left(-KX + \frac{\Delta t}{2} \right) + Q_1 \left(K - KX - \frac{\Delta t}{2} \right) \rightarrow \\ \rightarrow Q_2 &= C_1 I_1 + C_2 I_2 + C_3 Q_1 \end{aligned}$$

Ecuación 6

Donde $C_1 = \frac{KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}}$, $C_2 = \frac{-KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}}$ y $C_3 = \frac{K - KX - \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}}$. Si se conoce el hidrograma de entrada y por lo tanto el valor de $I(t)$ en cualquier instante, mediante el valor del caudal de salida para un único instante se puede estimar el valor del caudal de salida para cualquier instante.

Sin embargo, para poder calcular el caudal de salida para un cierto instante y en nuestro caso, para poder comprobar las hipótesis de nuestro estudio, es necesario calcular previamente los valores de K y X . En algunos casos se calcula K como el tiempo de propagación ó bien como el tiempo entre los centroides de ambos hidrogramas pero generalmente se utiliza la metodología que se explica a continuación.

El valor de K se puede obtener como el coeficiente entre ambas expresiones de la variación de volumen entre dos instantes 1 y 2 a partir de la Ecuación 5:

$$K = \frac{\frac{\Delta t}{2} [(I_2 + I_1) - (Q_2 + Q_1)]}{X(I_2 - I_1) + (1 - X)(Q_2 - Q_1)}$$

Ecuación 7

donde el numerador corresponde a la variación del almacenaje que se produce en el tramo definido por el punto de entrada y salida entre los instantes 1 y 2 y el denominador es la variación de caudal ponderado.

Si se conocen los hidrogramas de entrada y salida y para un cierto valor de X se puede calcular el valor de K para tantos instantes como se quiera, sin embargo es necesario saber qué valor de X debemos tomar. Para ello, se sigue la siguiente metodología:

- Se toman varios valores de X entre 0 y 0,5.
- Se define un intervalo de tiempo Δt .
- Se seleccionan los valores de los hidrogramas de entrada y salida para cada instante de tiempo, separados por el intervalo Δt .
- Para cada instante de tiempo, se utilizan los valores de los caudales de entrada y salida del propio instante (I_2 y Q_2 respectivamente) así como los del instante anterior (I_1 y Q_1) para calcular el valor de la variación de volumen almacenado (Ecuación 8) entre ambos instantes y el caudal ponderado para los caudales de entrada y salida del segundo instante (Ecuación 9).
- Se representan en una gráfica los valores anteriores del numerador y el denominador de la gráfica para cada X , donde el eje de las abscisas representa el denominador y el de las ordenadas el del numerador, generando curvas en forma de lazo (Figura 11).
- El valor de X que tomaremos será aquel cuya gráfica sea lo más próximo a una recta. Finalmente, el valor de K es precisamente la pendiente de dicha recta.

$$\frac{\Delta t}{2} [(I_2 + I_1) - (Q_2 + Q_1)]$$

Ecuación 8

$$XI_2 + (1 - X)Q_2$$

Ecuación 9

Como es lógico, el valor del intervalo de tiempo que se elige no puede ser aleatorio, sino que se debe encontrar dentro de un rango de valores para que cumplan con las condiciones de estabilidad²⁰:

- Deben evitarse valores de Δt que conlleven un valor del coeficiente $C_2 = \frac{-KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}}$ negativo. Esto se evita cuando $\Delta t > 2KX$.
- La segunda condición expresa que el intervalo de tiempo debe ser suficientemente pequeño de manera que se pueda asumir la variación de caudales lineal con el tiempo. Viessman²¹ traduce este requisito en la siguiente condición $\Delta t < 2K(1 - X)$.

Finalmente, el rango de valores de Δt queda definido como $2KX \leq \Delta t \leq 2K(1 - X)$ aunque Viessmann señaló que generalmente se asigna al intervalo de tiempo un valor dentro del rango $K/3 \leq \Delta t \leq K$, que será útil para hacer una primera aproximación del rango de intervalos de tiempo adecuados, a partir del tiempo de propagación de la avenida.

²⁰ TEWOLDE, M.H. Flood routing in ungauged catchments using Muskingum methods. Pietermaritzburg. School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology. University of KwaZulu-Natal. 2005.

²¹ VIESSMAN, W.; G.L. LEWIS; J.W. KNAPP. Introduction to Hydrology. New York, USA. Harper and Row. 1989.

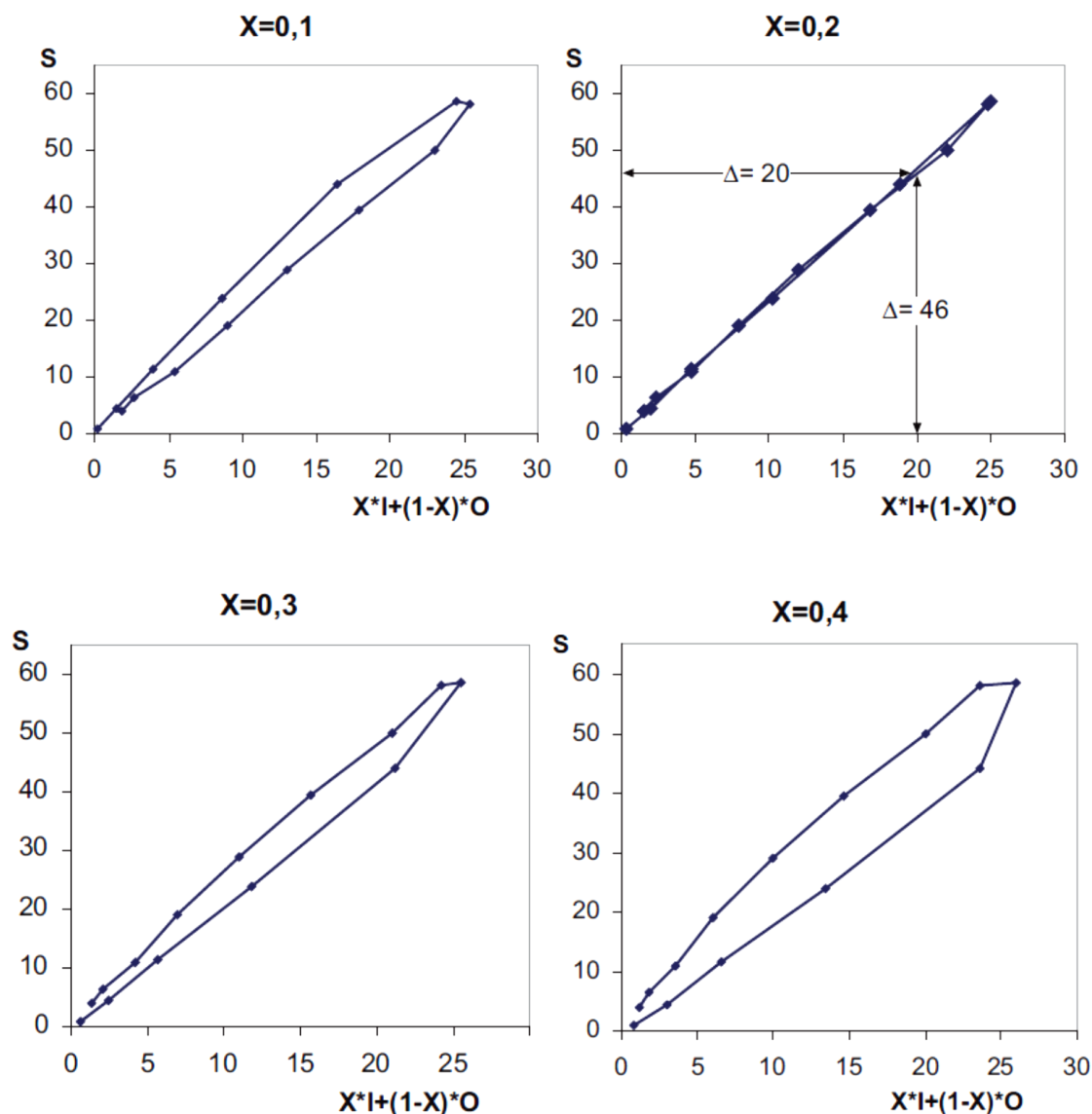


Figura 11: Gráficas que muestran las curvas de lazo correspondientes a los diferentes valores de X . En este caso, observamos que el valor más óptimo de X sería 0,2.

Es muy importante recalcar que los valores obtenidos de K y X variarán en función del intervalo de tiempo Δt y por lo tanto, es necesario para cada avenida analizar el intervalo de tiempo Δt permite obtener un resultado más óptimo, que se puede comprobar comparando el hidrograma obtenido a partir de la propagación del hidrograma de entrada con el hidrograma de salida Q para cada intervalo elegido.

Cabe destacar que existen otros métodos para ajustar los parámetros K y X del método de Muskingum, como por ejemplo el de ajuste por mínimos cuadrados. A pesar de que este método reduce la subjetividad implícita en el método gráfico a la hora de elegir que curva se parece más a una recta, se cree

que al utilizar el método de los mínimos cuadrados se pierde el significado físico de los parámetros²² y por lo tanto no es un método apropiado para calibrar los parámetros, aunque podría ser utilizado como método de comprobación, de manera que el método gráfico será el elegido para calibrar los parámetros K y X elegidas para realizar el estudio.

3.1.1 Método de Muskingum-Cunge

El método de Muskingum-Cunge fue obtenido por Cunge (1969) a partir del método anterior. Se suele utilizar ante la ausencia de un registro histórico de datos y solo se dispone del hidrograma del punto de entrada y a diferencia del método anterior, los parámetros K y X se calculan a partir de las propiedades del flujo. En este caso se sigue utilizando la expresión de la Ecuación 6 y los parámetros K y X se calculan mediante la Ecuación 10 y Ecuación 11 respectivamente.

$$K = \frac{\Delta x}{c_k}$$

Ecuación 10

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{b \cdot i \cdot c_k \cdot \Delta x} \right)$$

Ecuación 11

donde Δx es la longitud del tramo de estudio, c_k es la celeridad de la onda de la avenida para un determinado caudal Q , b es el ancho promedio de la superficie de agua del tramo Δx para un caudal Q y i es la pendiente promedio para el tramo Δx (NANÍA ESCOBAR, 2006).

De este método existen dos versiones, una con parámetros constantes y otra con parámetros variables²³. En el primer caso se calculan ambos parámetros para el caudal de entrada máximo o pico, mientras que en el segundo caso, una vez definido el intervalo de tiempo Δt que define los instantes para los que se calculará el caudal de salida, se deben calcular ambos parámetros (Ecuación 10 y Ecuación 11) para el caudal de entrada de cada instante.

En nuestro caso, se ha descartado utilizar este método ya que requiere de datos (especialmente la anchura de la superficie de agua) de los cuales no disponemos.

3.2 Significado físico de los parámetros K y X

Para poder analizar el significado físico de los parámetros K y X se pueden utilizar las expresiones de los parámetros anteriores que se definen en el método de Muskingum-Cunge (Ecuación 10 y Ecuación 11).

²² XIAOFANG, R; L. FANGGUI; Y. MEI. Discussion of Muskingum method parameter X. Water Science and Engineering, Vol. 1, No. 3: 16-23. 2008.

²³ Elbashir, S. Flood Routing in Natural Channels Using Muskingum Methods. Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the DIT's Master of Engineering Computation. 2011.

Como ya se ha mencionado antes, el parámetro K se corresponde con el tiempo de propagación de la onda de la avenida a través del cauce (Chow, 1988) y por lo tanto, el parámetro K depende del tramo de estudio del río (y más concretamente de su longitud) y de la celeridad de propagación de la onda de la avenida como se ha definido anteriormente (Ecuación 10).

Teniendo en cuenta que, a medida que aumenta el caudal máximo de una avenida, especialmente cuando debido al aumento del caudal máximo el río desborda, la velocidad de propagación de la avenida disminuirá, como se ha explicado previamente. Por lo tanto, para un tramo de longitud constante, a medida que aumenta el caudal máximo de la avenida (siempre y cuando el río desborde previamente a aumentar el caudal máximo) disminuirá la velocidad de propagación, aumentando el tiempo de propagación así como el valor de K.

Otros factores que también afectan al valor del parámetro K ya sea directamente o bien a través de caudal son el patrón de drenaje, la geología de la superficie, el tipo de suelo, la forma de la cuenca del río y la cobertura vegetal (Viessman, 1989) aunque en este estudio, debido a la falta de datos, no se tendrán en cuenta exhaustivamente.

Además, Perumal²⁴ demostró mediante un ensayo en tres canales de cauce único con propiedades diferentes que el tiempo de viaje de la onda y, por lo tanto el valor de K, es mayor para un caudal en la rama ascendente del hidrograma que para el mismo caudal en la rama descendente. Además, también se observó, tanto el grado de variación de K como su valor disminuyen, a medida que aumenta la pendiente del cauce y disminuye la rugosidad del cauce (Figura 12), aunque únicamente es válido para el caso de canales.

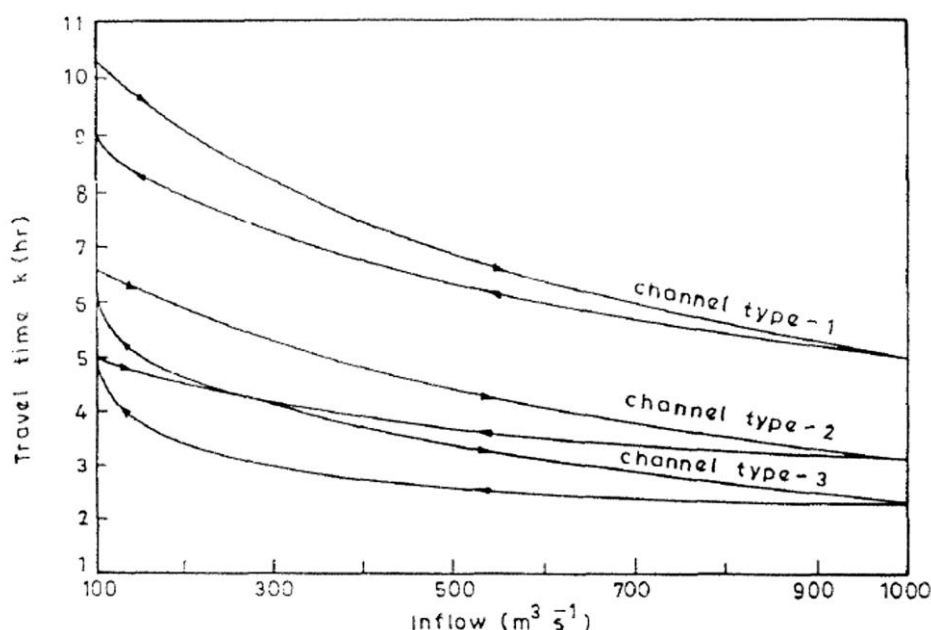


Figura 12: Gráfica que muestra la variación del parámetro K en función del caudal.

Para el método simple de Muskingum se limita el valor de X entre 0 y 0,5, siendo el valor de 0 para avenidas que solo dependen del caudal de salida, que sería equivalente a un embalse donde la variación del volumen de agua almacenado depende única y linealmente del caudal evacuado. Los valores de X

²⁴ PERUMAL, M. Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. Verification. Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques, 39: 443-458. 1994.

próximos a 0 corresponden a esas avenidas donde se manifiesta el fenómeno de la laminación, de manera que la avenida comporta un desbordamiento del río, que pasa a inundar una buena parte de la llanura de inundación.

Un valor de X igual a 0,5 corresponde a un tramo de río o canal donde el volumen de agua almacenado depende por partes igual de los caudales de entrada o salida. Este caso se da únicamente en canales muy regulares y uniformes de pendiente suave donde no se produce laminación de la avenida.

Generalmente, para flujos en ríos naturales típicos, el valor de X se suele situar entre 0 y 0,3, generalmente cercano a 0,2. Sin embargo, para ríos en los que no se produce inundación o bien el área inundada es muy pequeña (es decir, que una parte pequeña del caudal del río desborda) se pueden dar valores del parámetro X de entre 0,4 y 0,5 (BEDIENT, 2008).

4. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS K Y X

En este apartado se describen los datos de partida disponibles así como los criterios utilizados para discriminar cuáles de dichos datos serán usados finalmente para realizar el estudio. También se describen todas las modificaciones o transformaciones para adaptar los datos a la metodología de análisis propia del estudio. Posteriormente, se detallará el proceso seguido para calcular los parámetros K y X del método de Muskingum para cada una de las avenidas seleccionadas para realizar el informe.

4.1 Descripción de los datos disponibles para la realización del estudio

Como datos de partida, se dispone de información relativa a las avenidas del río Ebro registrada en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza, que se utilizaron en el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón" exceptuando las avenidas de marzo de 1949, mayo de 1956 y diciembre de 1960. Es decir, un total de 23. Estas avenidas son:

- Avenida de diciembre de 1962
- Avenida de junio de 1977
- Avenida de febrero de 1978
- Avenida de enero de 1979
- Avenida de febrero de 1979
- Avenida de diciembre de 1980
- Avenida de enero de 1981
- Avenida de abril de 1987
- Avenida de abril de 1988
- Avenida de abril de 1990
- Avenida de marzo de 1991
- Avenida de abril de 1991
- Avenida de mayo de 1991
- Avenida de diciembre de 1992
- Avenida de diciembre de 1993
- Avenida de enero de 1997
- Avenida de febrero de 2003
- Avenida de marzo de 2007
- Avenida de abril de 2007
- Avenida de junio de 2008
- Avenida de febrero de 2009
- Avenida de enero de 2010
- Avenida de enero de 2013

Los datos de estas avenidas corresponden a limnigramas o hidrogramas digitalizados, o en algunos casos a limnigramas documentados en papel.

Adicionalmente, para trabajar o analizar los datos anteriormente mencionados, también se utilizaron curvas de gastos de las estaciones de Castejón y Zaragoza, y anuarios de los registros de alturas y caudales de las estaciones de aforos del río Ebro en Miranda de Ebro o de otros afluentes importantes del tramo, especialmente las estaciones de aforo del río Jalón en Grisén o el río Arba en Gallur. Es importante mencionar que todos los datos requeridos para llevar a cabo este trabajo fueron proporcionados por la **Confederación Hidrográfica del Ebro**.

4.1.1 Curvas de gastos para las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza

Una curva de gasto (Figura 13), establece la relación entre altura y caudal para un determinado punto (sección) del río, durante un período determinado de tiempo en el cual se supone que el comportamiento hidráulico de la sección se mantiene estable²⁵. El comportamiento hidráulico de la sección se ve modificado cuando un evento modifica la sección del cauce, como por ejemplo, cuando se produce una avenida importante.

Las curvas de gastos se utilizan en particular para poder obtener el hidrograma (evolución del caudal con el tiempo) en un punto a partir del limnigrama (evolución de la altura con el tiempo), y en nuestro caso, se han utilizado para las estaciones de Castejón y Zaragoza. La Tabla 1 y Tabla 2 muestran el índice de las curvas de gastos de Castejón y Zaragoza respectivamente, de las que se disponen datos. Las curvas de gastos para las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza se construyen como interpolación lineal de parejas de datos altura-calado obtenidas en la estación de aforo, de manera que se suelen obtener a partir de 15 pares y hasta 50 pares de datos.

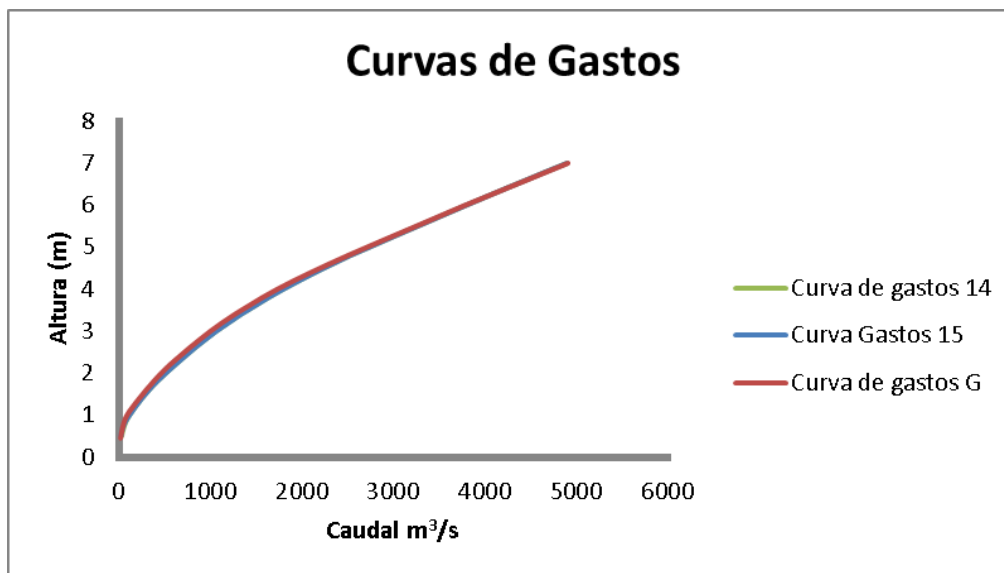


Figura 13: Gráfico que representa las curvas de gastos 14, 15 y G (consecutivos en el tiempo) de la estación de aforos de Castejón y donde se observa que las variaciones entre ellas son prácticamente inapreciables.

²⁵ Confederación hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. La cuenca. Información hidrológica. Redes hidrológicas. ROEA. (Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2221&idMenu=2188>)

Código Tabla Gasto	Período de Validez	
	Fecha Inicio	Fecha Fin
B	01/10/1980	31/12/1981
12	01/01/1982	30/09/1987
D	01/10/1987	24/04/1990
E	25/04/1990	17/04/1991
F	18/04/1991	05/09/1991
G	06/09/1991	10/04/1992
H	11/04/1992	30/09/1992
I	01/10/1992	10/12/1992
J	11/12/1992	28/12/1993
K	29/12/1993	11/04/1994
L	12/04/1994	19/07/1994
M	20/07/1994	06/07/1997
M2	07/07/1997	06/02/2003
Q1	07/02/2003	02/06/2008
Q3	03/06/2008	07/11/2011
Q5	08/11/2011	10/06/2013
Q6	11/06/2013	

Tabla 1: Tabla donde se muestra el código o nombre de cada curva de gastos de la estación de aforo de Castejón, juntamente con el período de validez de cada una.

Código Gasto	Tabla	Período de Validez	
		Fecha Inicio	Fecha Fin
14		17/01/1979	19/01/1981
15		20/01/1981	18/01/1988
G		19/01/1988	08/08/1989
H1		09/08/1989	13/12/1992
I		14/12/1992	21/12/1997
K3		22/12/1997	09/08/2007
L		10/08/2007	14/11/2007
L2		15/11/2007	14/08/2008
L4		15/08/2008	15/02/2009
M		16/02/2009	14/06/2009
M1		15/06/2009	17/01/2010
N1		18/01/2010	31/05/2011
N4		01/06/2011	23/01/2013
N5		24/01/2013	-

Tabla 2: Tabla donde se muestra el código o nombre de cada curva de gastos de la estación de aforo de Zaragoza, juntamente con el período de validez de cada una.

Además, como se detallará más adelante, para la avenida de junio de 1977 ha sido necesario construir una curva de gastos, correspondiente al período en el cual la avenida tiene suceso, ya que como se puede observar en la Tabla 1 y Tabla 2 no se disponen de información para antes de 1979.

4.1.2 Datos de las avenidas

Como se ha explicado anteriormente, el SAIH está formado por un conjunto de estaciones de aforo que se encargan de medir el nivel del río periódicamente (actualmente los datos se registran cada 15 minutos). A partir de los datos del nivel del río en función del tiempo se construye un limnigrama (Figura 14), que además también nos da una idea de cuál será la variación del caudal a lo largo del tiempo (ya que el caudal es proporcional al nivel del río).

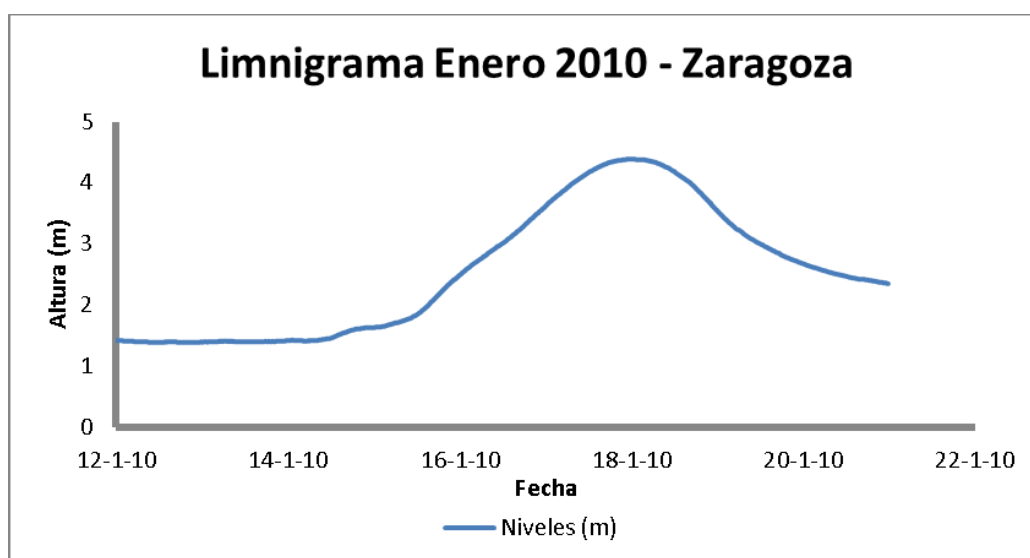


Figura 14: Limnigrama de la avenida de Enero de 2010 correspondiente al nivel del río observado a la estación de aforo del río Ebro en Zaragoza (9011).

El SAIH no empezó a registrar digitalmente los valores obtenidos en las diferentes estaciones de aforo hasta febrero de 1997, de manera que los datos sobre el nivel del río, correspondientes al período previo a febrero de 1997 se conservan en limnigramas registrados en papel (Figura 15).

Después de febrero de 1997, toda la información se empezó a registrar digitalmente, de manera que se puede consultar a través de SAIH en cualquier momento. Adicionalmente, también se dispone de la versión digitalizada de algunas avenidas previas a febrero de 1997, y que se utilizaron en “ANÁLISIS DEL TRÁNSITO DE AVENIDAS DEL EBRO ENTRE CASTEJÓN Y ZARAGOZA”²⁶.

Para digitalizar los limnigramas de las avenidas anteriores a febrero de 1997 de las que no se dispone de versión digital, deberemos escanear los limnigramas y posteriormente, utilizaremos el software Plot

²⁶ FANLO, G. Análisis del tránsito de avenidas del Ebro entre Castejón y Zaragoza. Proyecto final de postgrado en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Zaragoza. Universidad de Zaragoza. 2006.

Digitizer, que a partir de asignar la escala de los ejes, permite obtener el valor de cualquier punto de un gráfico. Finalmente, se ha utilizado el software Plot Digitizer para digitalizar las avenidas correspondientes a abril de 1987, abril de 1990 y las avenidas de marzo, abril y mayo de 1991.

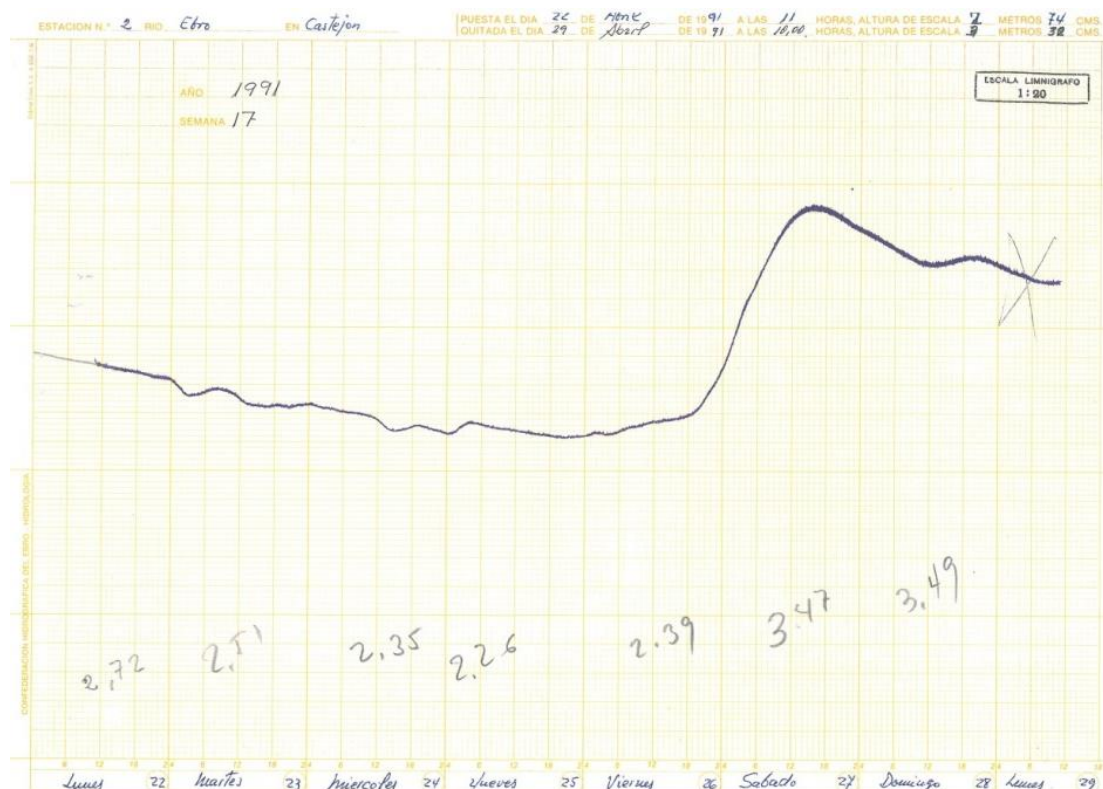


Figura 15: Limnigrama registrado en papel, de la avenida de abril de 1991, correspondiente al nivel del río observado en la estación de aforo de Castejón (9002).

Sin embargo, para poder aplicar el método de **Muskingum**, se requieren hidrogramas (en nuestro caso, los hidrogramas de las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza) que muestran cual es la variación del caudal a lo largo del tiempo. Como se ha explicado previamente, los hidrogramas se obtienen a partir de limnigramas mediante curvas de gastos.

A partir de febrero de 1997, el SAIH no solo empezó a registrar los niveles de los ríos digitalmente, sino que empezó a elaborar automáticamente los hidrogramas a medida que se recibía los datos del limnigrama de una avenida; sin embargo, es muy probable que la curva de gastos de una estación varíe durante una avenida importante. Si se produce un cambio notable en la curva de gastos, de manera que se cambia la curva de gastos a utilizar para el cálculo de hidrogramas, generalmente se considera que la curva de gastos cambia justo cuando se produce el pico de la avenida.

La obtención de la nueva curva de gastos no es inmediata, sino que se lleva a cabo posteriormente al pico de la avenida. Como es lógico, esto genera un decalaje entre el momento en el que se debería empezar a utilizar la nueva curva de gastos (pico de la avenida), y el momento en la que se obtiene, de manera que durante un periodo de tiempo el SAIH genera el hidrograma con una curva de gastos diferente de la que se debería utilizar.

Para subsanar este error de los hidrogramas directamente proporcionados desde el SAIH, en el caso que correspondan a una avenida que coincide con un período en el que se cambia de curva de gastos para el cálculo de hidrogramas en la estación, se deben recalcular los caudales registrados después de la fecha de

cambio de la curva de gastos, aunque es posible que los caudales obtenidos a penas varíen de los proporcionados por el SAIH (Figura 16). Una vez obtenido el hidrograma con los caudales corregidos, en principio ya se puede obtener los parámetros característicos del método de Muskingum.

Las avenidas para las que se han tenido que recalcular los caudales ha sido: febrero de 2003, junio de 2008, febrero de 2009, enero de 2010 y enero de 2013.

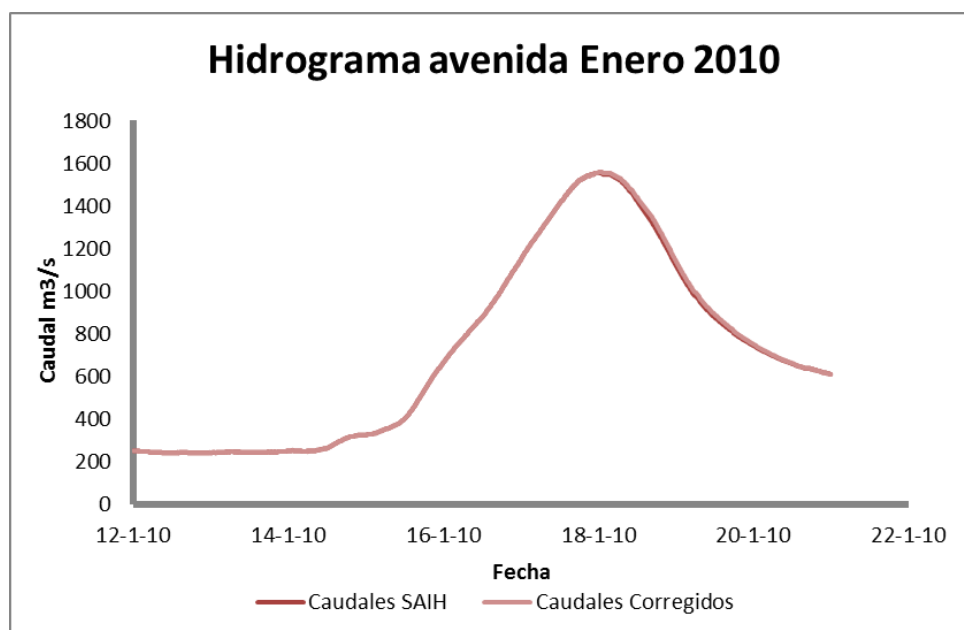


Figura 16: Gráfica que muestra los hidrogramas correspondientes a la avenida de enero de 2010, uno creado directamente a partir de los caudales proporcionados por el SAIH, y el segundo aplicando el cambio de curva de gastos correspondiente.

Finalmente, se ha tenido que obtener el hidrograma a partir de su limnigrama mediante curvas de gastos (es decir avenidas previas a febrero de 1997 de las que no se disponían de datos digitales de sus hidrogramas) para las avenidas de junio de 1977 (que además se han tenido que construir curvas de gastos para esta avenida), abril de 1987, abril de 1990, marzo de 1991, abril de 1991, mayo de 1991, diciembre de 1992, diciembre de 1993 y enero de 1997.

4.2 Selección de avenidas para el estudio

No todas las avenidas de las que se disponen datos, y fueron utilizadas en "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón", deben serlo en este estudio, ya sea porque se desvían del comportamiento observado de las avenidas del mismo período de tiempo, o bien sus características hacen que no sea adecuado aplicar el método de **Muskingum** para dicha avenida.

En primer lugar, a partir del ábaco extraído del "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón", donde se plasma la relación entre el nivel del

río en Castejón y en Zaragoza para cada una de las avenidas utilizadas en dicho informe, podemos descartar las avenidas cuyo comportamiento dista del observado para el resto de avenidas, para cada período durante el cual la relación entre el nivel en Castejón y Zaragoza se ha mantenido estable (cada una de las rectas diagonales del ábaco, Figura 6) ya que su comportamiento atípico puede ser consecuencia de que el cauce se ha visto modificado durante o previamente al suceso de dichas avenidas, y por lo tanto, los parámetros del método de **Muskingum** que se obtendrían para dichas avenidas no se podrían relacionar con el estado del cauce.

Para el primer grupo de avenidas, desde 1949 hasta 1987, se puede observar que las avenidas de marzo de 1949, mayo de 1946, febrero de 1978, enero de 1979, diciembre de 1980 y enero de 1981, tienen una relación de nivel del río en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza bastante distante de la relación predominante observada en otras avenidas (Figura 17) y, en consecuencia, se descartan para ser utilizadas en el estudio.

Para el segundo grupo de avenidas, desde 1988 hasta 1991, a posteriori de dragar el río, se observa que todas las avenidas presentan una relación entre niveles del río en Castejón y Zaragoza muy parecida (Figura 18), y por lo tanto pueden ser utilizadas en el estudio.

Para el tercer grupo de avenidas, entre 1991 y 2003, aunque todas las avenidas tienen una relación entre niveles del río en Castejón y Zaragoza bastante parecida (Figura 19), se constata que las avenidas de diciembre de 1992 y diciembre de 1993 pueden presentar una relación entre niveles del río un poco diferente del resto, y por consiguiente, se deberá observar si los parámetros del método de **Muskingum** ponen de manifiesto esta pequeña variación.

En el cuarto grupo de avenidas, entre 2007 y 2009, se vuelve a apreciar un comportamiento parecido en todas las avenidas del grupo (Figura 20), a pesar de que la avenida de febrero de 2009 tiene una relación entre niveles del río que dista un poco del resto y también se deberá observar si los parámetros del método de **Muskingum** de esta avenida confirman esta pequeña variación.

Finalmente, para el último grupo, formado únicamente por dos avenidas, una en 2010 y otra en 2013, se observa que el comportamiento de ambas avenidas es lógico (la relación entre niveles en la estación de Castejón y Zaragoza se mantiene paralela al resto de periodos) (Figura 21), y por lo tanto son aptas para ser utilizadas en el estudio.

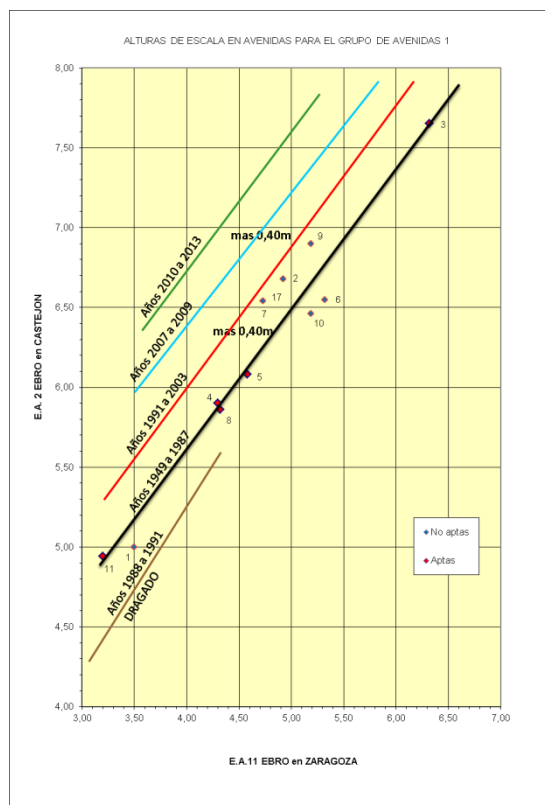


Figura 17: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 1 de avenidas (1949-1987).

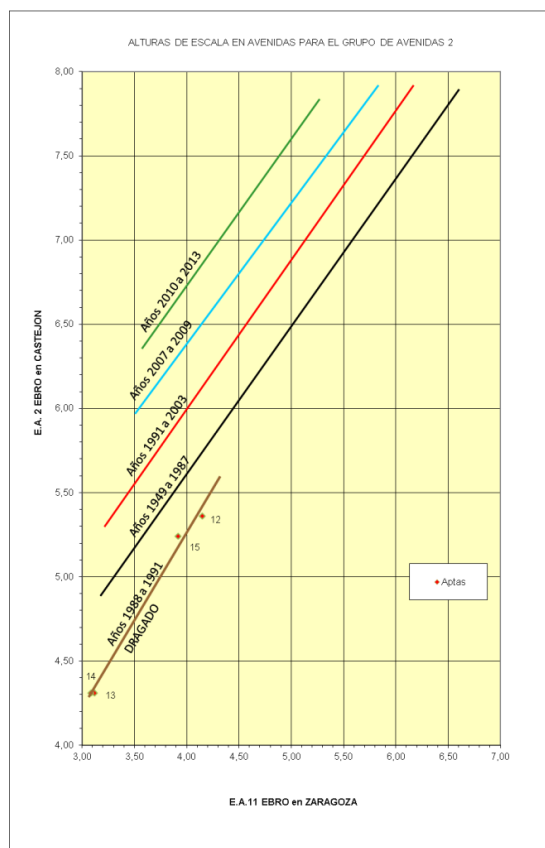


Figura 18: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 2 de avenidas (1988-1991).

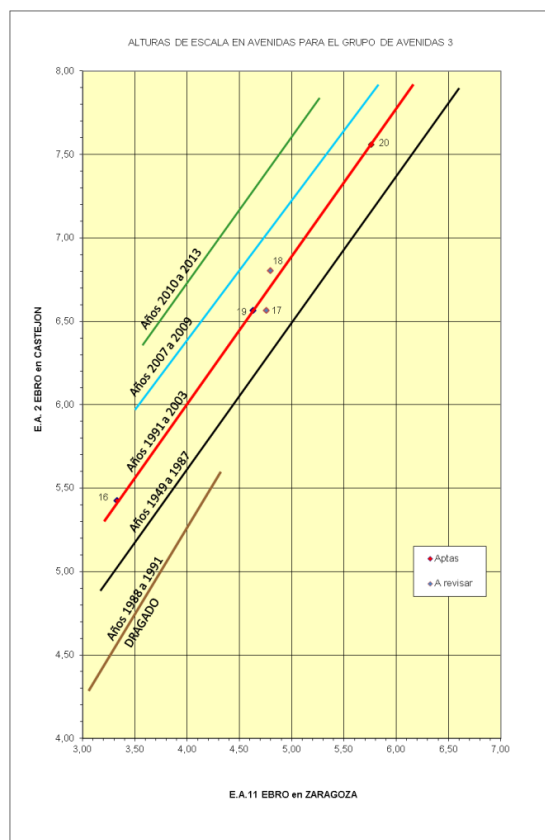


Figura 19: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 3 de avenidas (1991-2003).

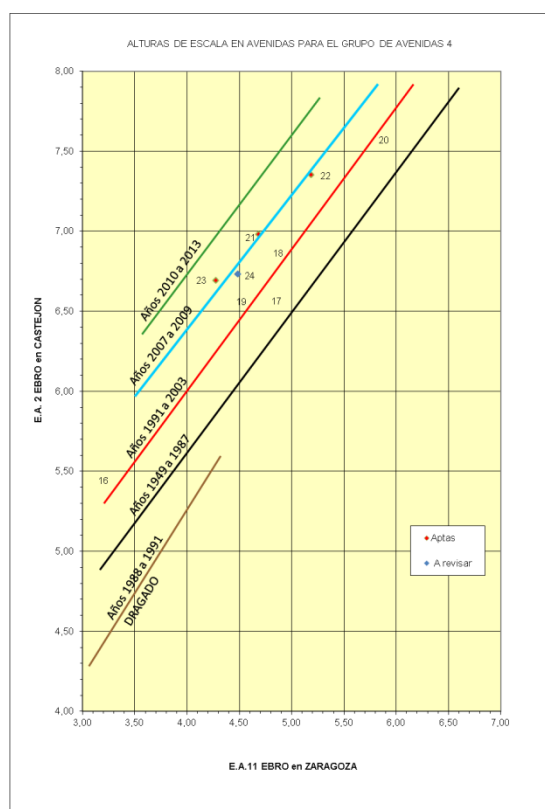


Figura 20: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas y no aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 4 de avenidas (2003-2009).

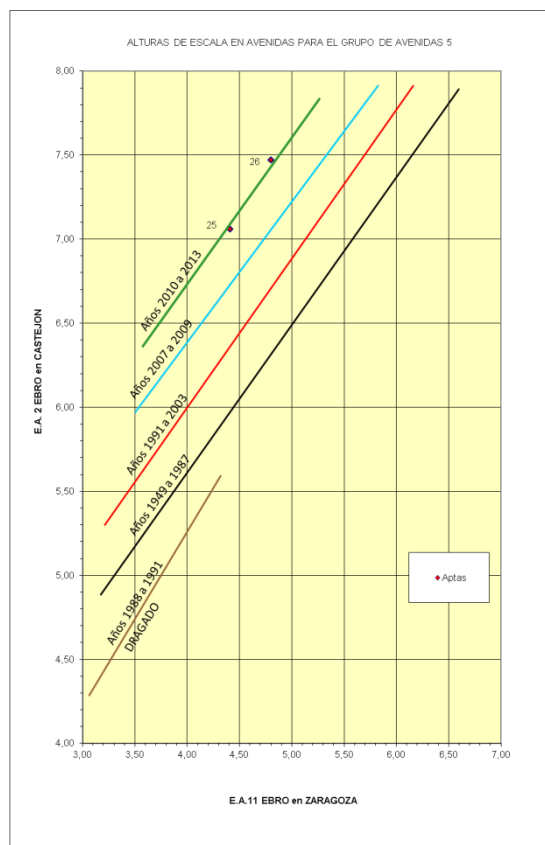


Figura 21: Ábaco donde se plasman las avenidas aptas para ser utilizadas en el estudio para el grupo 5 de avenidas (2010-2013).

El método de Muskingum no contempla que haya caudal lateral, es decir, que aparte del caudal de entrada no puede haber otras fuentes que aporten caudal, como podría ser un afluente. Como se explica en el apartado 2.3 Características de las avenidas del trabajo, el hecho de que la mayoría del caudal en caso de avenida provenga de los ríos Aragón y Arga, nos permite despreciar el caudal lateral u otras fuentes de caudal en la mayoría de los casos.

Sin embargo, es posible que en algunas avenidas en concreto esto no sea así, manifestándose de manera clara en las avenidas en las que el caudal pico en la estación de aforos de Zaragoza sea mayor que el caudal pico en las estaciones de Castejón, ya que el efecto de la laminación de la avenida se ve contrarrestado y superado por los aportes laterales de caudal, de manera que sería erróneo aplicar el método de Muskingum ya que el caudal aportado por otras fuentes no es despreciable.

De las avenidas previamente seleccionadas, han sido descartadas las avenidas de diciembre de 1962, febrero de 1979, abril de 1988 y abril de 2007, al ser para dichas avenidas el caudal pico medido en la estación de aforos de Zaragoza mayor que en Castejón (Tabla 3).

		EA 2 CASTEJON	EA 11 ZARAGOZA
Nº	FECHA	Q	Q
Grupo 1			
4	dic-62	2.120	2.390
5	jun-77	2.628	2.437
8	feb-79	2.074	2.126
11	abr-87	1.372	1.200
Grupo 2			
12	abr-88	1.788	1.869
13	abr-90	1.088	1.007
14	mar-91	1.088	977
15	abr-91	1.692	1.549
Grupo 3			
16	may-91	1.837	1.427
17	dic-92	2.380	2.301
18	dic-93	2.595	2.140
19	ene-97	2.380	2.004
20	feb-03	2.883	2.823
Grupo 4			
21	mar-07	1.866	1.721
22	abr-07	2.144	2.282
23	jun-08	1.710	1.567
24	feb-09	1.736	1.619
Grupo 5			
25	ene-10	1.935	1.572
26	ene-13	2.235	1.868

Tabla 3: Tabla donde se muestran el caudal pico o máximo para las avenidas previamente seleccionadas. Se muestran en rojo las avenidas cuyo caudal máximo medido en Zaragoza es mayor que el caudal máximo medido en Castejón y por lo tanto, han sido descartadas para la realización del trabajo. También se muestran en verde las avenidas cuyo caudal máximo medido en Zaragoza es ligeramente menor al caudal máximo medido en Castejón y por lo tanto deben ser analizadas posteriormente de obtener los parámetros K y X.

Además, para aquellas avenidas en las que el caudal pico medido en la estación de aforo de Zaragoza es ligeramente inferior al caudal pico medido en la estación de aforo de Castejón (marcadas en verde en la Tabla 3) deberá analizarse una vez obtenidos los parámetros del método de Muskingum, si el caudal lateral es despreciable y la similitud entre caudales pico medidos se debe a la leve laminación de la avenida o por lo contrario, el caudal lateral es importante y por lo tanto ha sido erróneo aplicar el método de Muskingum.

A parte de las características que deben cumplir las avenidas para ser consideradas apropiadas para la realización del estudio, la manera en cómo se desarrolla y evoluciona una avenida (y por lo tanto, la forma que tienen su hidrograma y limnigrama) también puede condicionar los resultados obtenidos al calibrar los parámetros K y X del método de Muskingum. En concreto, según qué tipo de avenidas pueden modificar el cauce durante el desarrollo de la misma, haciendo que el resultado obtenido para estas

avenidas no sea de interés, ya que no se puede correlacionar con el estado del cauce del río, que varía durante el desarrollo de la avenida.

Como se ha introducido en el apartado 2.3 Características de las avenidas, no se tendrán en consideración aquellas avenidas que hayan sido precedidas (en un intervalo de tiempo más bien corto) por avenidas generadas en su mayoría en el sistema Cantábrico (fenómeno poco frecuente). Las avenidas generadas en su mayoría en el sistema Cantábrico, circularán más limpias de sedimentos, es decir, transportarán una cantidad bastante menor de sedimentos, en proporción, de las que se generan en los Pirineos, al reducirse la contribución del río Arga y Aragón, aportadores extraordinarios de sedimentos.

Cuando una avenida, que transporta una cantidad de sedimentos menor de lo que potencialmente podría (el potencial de transporte de sedimentos de una avenida viene determinada principalmente por su caudal, así como otras propiedades del flujo, mientras que el transporte en si también depende de la disponibilidad de sedimentos en el cauce del río) (Martín Vide, 2002), tenderá a “arrancar” los sedimentos depositados en el cauce (depositados por las avenidas que son generadas en su mayoría en los Pirineos) equilibrando su potencial de transporte de sedimentos, de manera que actuará “limpiando” el cauce de sedimentos, y por lo tanto, modificando su estado.

El suceso de estas avenidas “limpiadoras” que modifican el cauce producirá que, cuando otra avenida circule sin que haya pasado un tiempo suficiente para que se hayan depositado de nuevo sedimentos en el cauce del río, su comportamiento pueda ser diferente al resto de avenidas que circulan con las características morfológicas (relativamente estables) de cada uno de los períodos analizados en el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón".

A parte de las avenidas precedidas por crecidas “limpiadoras” del cauce, también deberían descartarse aquellas avenidas que, a diferencia de producirse de forma súbita, puedan tener varios picos y crecer de forma más lenta.

El curso de un río, así como la sección en un cierto punto, es un sistema dinámico²⁷, de manera que el cauce y las llanuras de inundación de un río deben su forma al caudal que circula por él. En particular, se conoce como caudal dominante al caudal que genera la geometría de un cauce, que además, coincide con el caudal de cauce lleno, y es el caudal que desarrolla una mayor acción modificadora sobre el cauce.

Cuando una avenida tiene varios picos (Figura 22), de manera que alguno precede al máximo absoluto, este pico “menor” modificará la morfología del cauce (no hace falta que el caudal tenga el valor del caudal dominante, basta con que corresponda a un caudal de valor elevado, por encima de lo normal; el valor de la acción modificadora o modeladora, que se mide en unidades de tensión superficial aumenta con el caudal hasta el caudal dominante, a partir del cual se estabiliza), de manera que el pico absoluto (el cual es un dato importante para el estudio de avenidas) circulará por un cauce con unas características que, en algunos casos, será notablemente diferente a las del inicio de la avenida.

²⁷ OLLERO, A.; D. BALLARÍN; D. MORA. Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón. Geographicalia, vol. 50, p. 87-109. 2006.

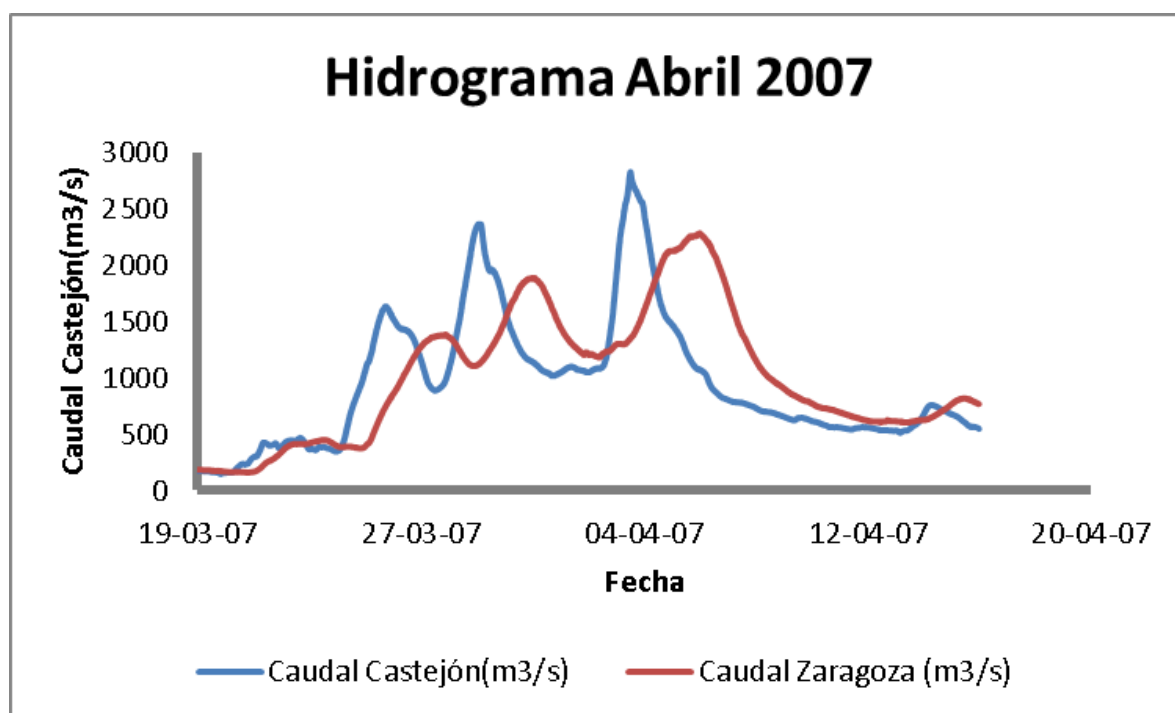


Figura 22: hidrogramas observados en las estaciones de aforo de Castejón (9002) y Zaragoza (9011) correspondientes a la avenida de abril de 2007, donde se puede observar dos picos que preceden al pico absoluto y que podría modificar la morfología del cauce.

Además, en el caso que este pico “menor” produjera un desborde del río, el río ocuparía las llanuras de inundación colindantes, de manera que se depositarían parte de los sedimentos transportados por el río en estas, aumentando la cota de las llanuras de inundación y, en consecuencia, profundizando el cauce respecto las llanuras, lo que supone una importante modificación de las características del cauce (Martín Vide, 2002).

Por los motivos anteriormente descritos, se ha decidido prescindir directamente de la avenida de abril de 1987. Además, deberán tenerse en especial consideración a la hora de analizar los resultados las avenidas de abril de 1990 (cuyos picos no son tan elevados como la de abril de 1987 y no ser cercanas al valor del caudal dominante del tramo de río Ebro cercano a Castejón, cercano a $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$) y las de marzo, abril y mayo de 1991, por el mismo motivo anterior y por ser tan cercanas en el tiempo.

4.3 Cálculo de los parámetros K y X para las avenidas seleccionadas.

Como se explica en el apartado 3.1 Método de Muskingum, el ajuste de los parámetros K y X del método de Muskingum se ha hecho mediante el ajuste según el modo gráfico. El número de instantes que se usan para crear las gráficas que sirven para seleccionar cual es el valor de X más adecuado, dependerá de cada avenidas además del intervalo seleccionado. En algunos casos, teniendo en cuenta que para construir estas gráficas siempre se seleccionan los instantes correspondientes a los picos de cada hidrograma, no nos interesará tener muchos puntos a parte de los que representan los picos ya que, por ejemplo, en muchas avenidas en las que se han dado picos previos de magnitud muy inferior a al pico de la avenida, puede darse que el valor de la rama ascendente del hidrograma de Zaragoza sea mayor que el de Castejón, hecho que a priori no nos interesa.

Debido a la gran subjetividad que conlleva el ajuste de los parámetros K y X mediante el método gráfico, además de que no siempre se obtiene gráficos donde se puede observar claramente formas parecidas a

una recta, en algunos casos, a partir de los valores de X que dan gráficas lo más parecido posible a una recta, se acaban de ajustar los parámetros a partir de comparando los hidrogramas “propagados” con el hidrograma de la estación de aforo de Zaragoza.

Los datos completos para el ajuste de los parámetros del método de Muskingum para cada avenida se pueden encontrar en el ANEXO A.

4.3.1 Avenida de junio de 1977

Al ser utilizada para el proyecto final de post-grado “Análisis del tránsito de avenidas del Ebro entre Castejón y Zaragoza”, para esta avenida se disponía de limnigrama digitalizado. Al ser una crecida anterior a 1979, no se disponía de curva de gastos para obtener el hidrograma y, por lo tanto, se tuvo que construir una curva de gastos (Tabla 4), para las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza.

Para ello, se utilizaron los datos de niveles del río y caudales máximos diarios de los años hidrológicos 1976-1977 y 1977-1978 (de octubre del primero hasta septiembre del segundo, ambos incluidos) de los anuarios de aforos²⁸ de las estaciones de Castejón y Zaragoza (cuyos códigos son respectivamente 9002 y 9011).

Una vez obtenido los hidrogramas, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es 194.400 segundos, medido, al igual que para el resto de las avenidas, como el tiempo entre los picos de ambos hidrogramas, (2 días y 6 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de precisamente 194.400 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 5. Para estos parámetros, no se cumplen las condiciones de estabilidad, pero se observa que la propagación (que al igual que el resto de avenidas, se ha calculado mediante la Ecuación 6) es relativamente buena (sobre todo para estimar el tiempo de propagación y la magnitud del caudal pico) a pesar de no estimar precisamente los valores de la rama de subida del hidrograma (Figura 23).

Estación Zaragoza		Estación Castejón	
Caudal (m3/s)	Calado (m)	Caudal (m3/s)	Calado (m)
286,8	1,5	210,0	2,5
323,2	1,6	250,0	2,6
360,2	1,7	282,5	2,7
400,0	1,8	315,0	2,8
440,0	1,9	347,5	2,9
480,0	2	380,0	3
525,0	2,12	420,0	3,1
555,0	2,2	460,0	3,2
645,0	2,4	502,5	3,3
755,5	2,62	545,0	3,4

²⁸ Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Visor de estaciones de aforo (Disponible en: <http://sig.magrama.es/aforos/>).

855,5	2,81	582,5	3,5
988,0	3,04	620,0	3,6
1100,0	3,2	677,5	3,7
1240,0	3,4	776,0	3,9
1358,0	3,56	808,8	3,98
1550,0	3,8	881,5	4,11
1723,0	4,01	934,2	4,2
1970,0	4,2	992,8	4,3
2100,0	4,3	1063,1	4,42
2379,2	4,52	1110,0	4,5
2532,8	4,68	1189,2	4,62
3065,4	5,23	1255,2	4,72
		1308,0	4,8
		1374,0	4,9
		1440,0	5
		1747,4	5,29
		1885,2	5,42
		2001,8	5,53
		2118,4	5,64
		2160,8	5,68
		2266,8	5,78
		2457,6	5,96
		3236,0	6,46

Tabla 4: Tabla donde se muestran los datos utilizados para construir las curvas de gastos, para las estaciones de Zaragoza y Castejón, para la avenida de junio de 1977.

K (segundos)	135060	X	0,42
--------------	--------	---	------

Tabla 5: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 1977.

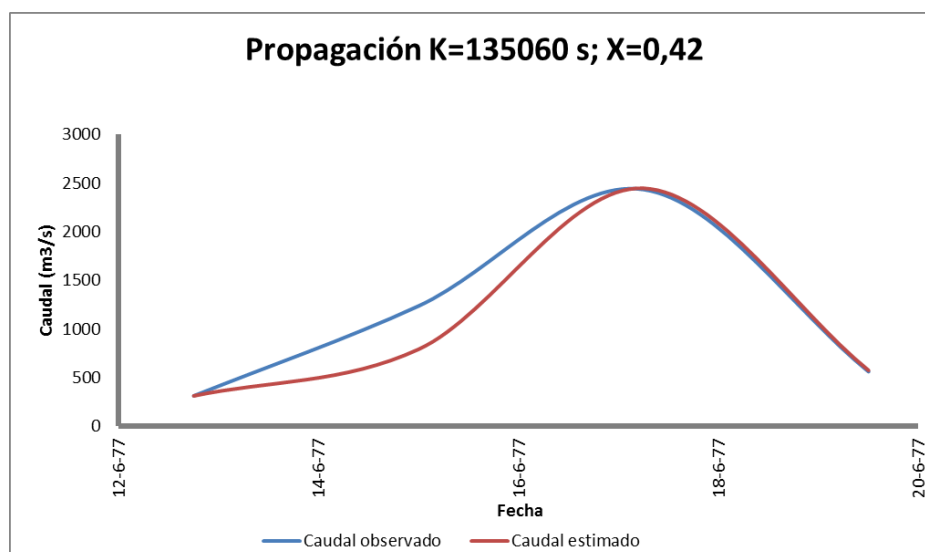


Figura 23: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de junio de 1977.

4.3.2 Avenida de abril de 1987

Para esta avenida sólo se disponía del limnigrama en papel de las estaciones de Castejón y Zaragoza, de manera que en primer lugar se tuvo que digitalizar el limnigrama mediante el software Plot Digitizer.

Una vez obtenida la versión digital del limnigrama, se calculó el hidrograma utilizando la curva de gastos D (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos 15 (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenido los hidrogramas, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 108.000 segundos (1 día y 6 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 43.200 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 6. Para estos parámetros e intervalo de tiempo, la propagación es bastante buena si se considera todo el hidrograma (Figura 24), ya que para intervalos de tiempo superior (el caudal pico se transforma en un único punto en lugar de tres) se propaga con mayor precisión el caudal pico pero, sin embargo, se pierde mucha precisión para el resto de puntos.

K (segundos)	94.480	X	0,2
--------------	--------	---	-----

Tabla 6: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1987.

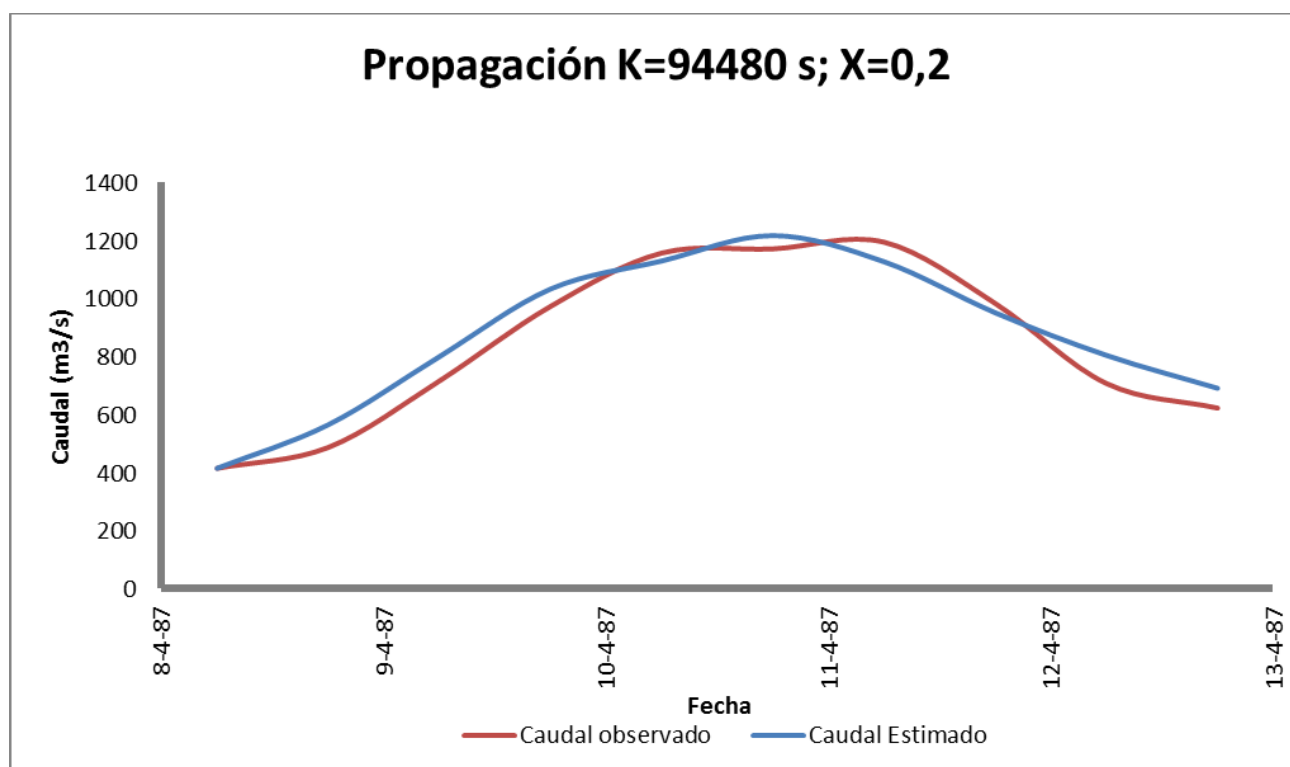


Figura 24: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1987.

4.3.3 Avenida de abril de 1990

Para esta avenida, al igual que la anterior, sólo se disponía del limnigrama en papel de las estaciones de Castejón y Zaragoza, de manera que en primer lugar se tuvo que digitalizar el limnigrama mediante el software Plot Digitizer.

Una vez obtenida la versión digital del limnigrama, se calculó los hidrogramas utilizando la curva de gastos D (para todos los datos previos al 25 de abril de 1990) y la curva E (para los posteriores) (Tabla 1Tabla) para los datos de la estación de aforo de Castejón y la curva de gastos H1 (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenido los hidrogramas, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es 86.400 segundos (1 día), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de aproximadamente 86.400 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 7. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una aproximación buena, especialmente para el pico de la avenida, estimando casi perfectamente tanto la magnitud del caudal pico como el tiempo de propagación (Figura 25).

K (segundos)	78.616	X	0,35
--------------	--------	---	------

Tabla 7: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1990.

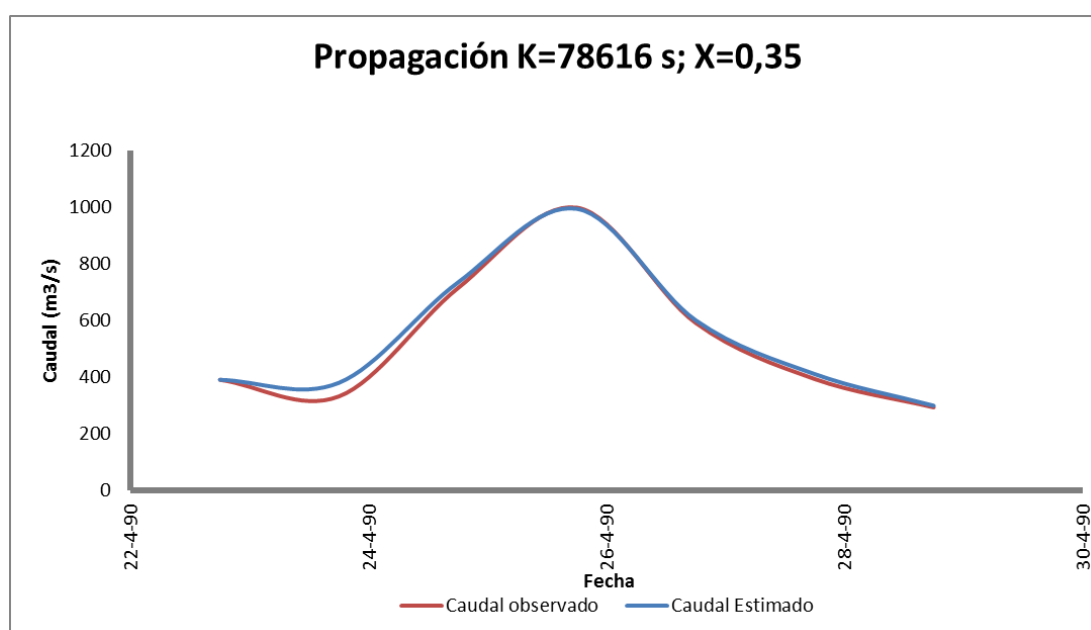


Figura 25: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1990.

4.3.4 Avenida de marzo de 1991

Para esta avenida, al igual que las anteriores, sólo se disponía del limnigrama en papel de las estaciones de Castejón y Zaragoza, de manera que en primer lugar se tuvo que digitalizar el limnigrama mediante el software Plot Digitizer.

Una vez obtenida la versión digital del limnigrama, se calculó los hidrogramas utilizando la curva de gastos E (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos H1 (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenido los hidrogramas, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es 86.400 segundos (1 día), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 86.400 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 8. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una aproximación buena, especialmente para el pico de la avenida, estimando de manera casi perfecta tanto la magnitud del caudal pico como el tiempo de propagación (Figura 26).

K (segundos)	86.331	X	0,36
--------------	--------	---	------

Tabla 8: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de marzo de 1991.

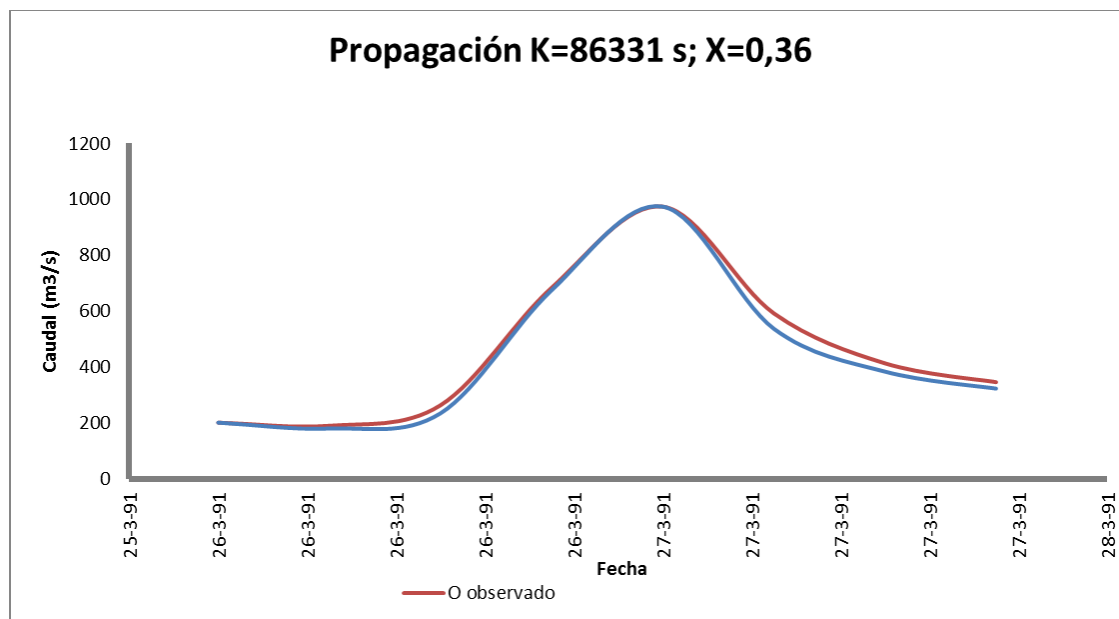


Figura 26: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de marzo de 1991.

4.3.5 Avenida de abril de 1991

Para esta avenida, al igual que las anteriores, sólo se disponía del limnigrama en papel de las estaciones de Castejón y Zaragoza, de manera que en primer lugar se tuvo que digitalizar el limnigrama mediante el software Plot Digitizer.

Una vez obtenida la versión digital del limnigrama, se calculó los hidrogramas utilizando la curva de gastos E (para los datos previos al día 18 de abril de 1991) y la curva de gastos F (para los datos del propio día 18 de abril de 1991 y posteriores) (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos H1 (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenidos los hidrogramas, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es 108.000 segundos (1 día y 6 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 108.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 9. Para estos parámetros e intervalo de tiempo, se obtiene una aproximación muy buena, donde las diferencias que se aprecian son muy pequeñas (Figura 27).

K (segundos)	97.362	X	0,42
--------------	--------	---	------

Tabla 9: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de abril de 1991.

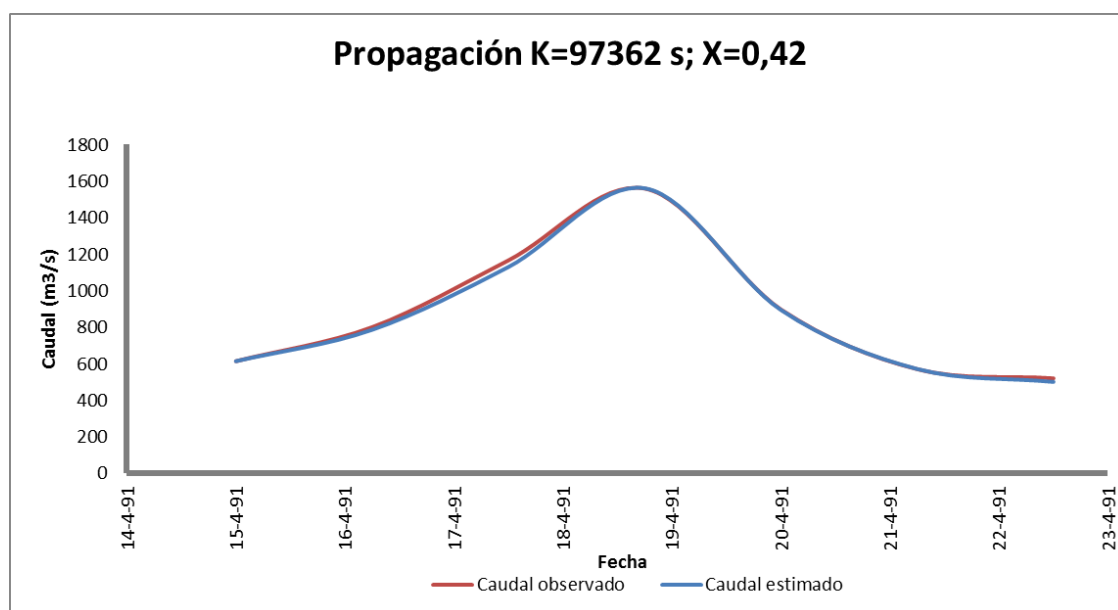


Figura 27: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1991.

4.3.6 Avenida de mayo de 1991

Para esta avenida, al igual que las anteriores, sólo se disponía del limnigrama en papel de las estaciones de Castejón y Zaragoza, de manera que en primer lugar se tuvo que digitalizar el limnigrama mediante el software Plot Digitizer.

Una vez obtenida la versión digital del limnigrama, se calculó los hidrogramas utilizando la curva de gastos F (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos H1 (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenidos los hidrogramas, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es, al igual que la anterior, 108.000 segundos (1 día y 6 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 108.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 10. Para estos parámetros e intervalo de tiempo, se obtiene una aproximación muy buena, sólo se aprecian pequeñas diferencias entre las colas de ambos hidrogramas (Figura 28).

K (segundos)	64.178	X	0,2
--------------	--------	---	-----

Tabla 10: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de mayo de 1991.

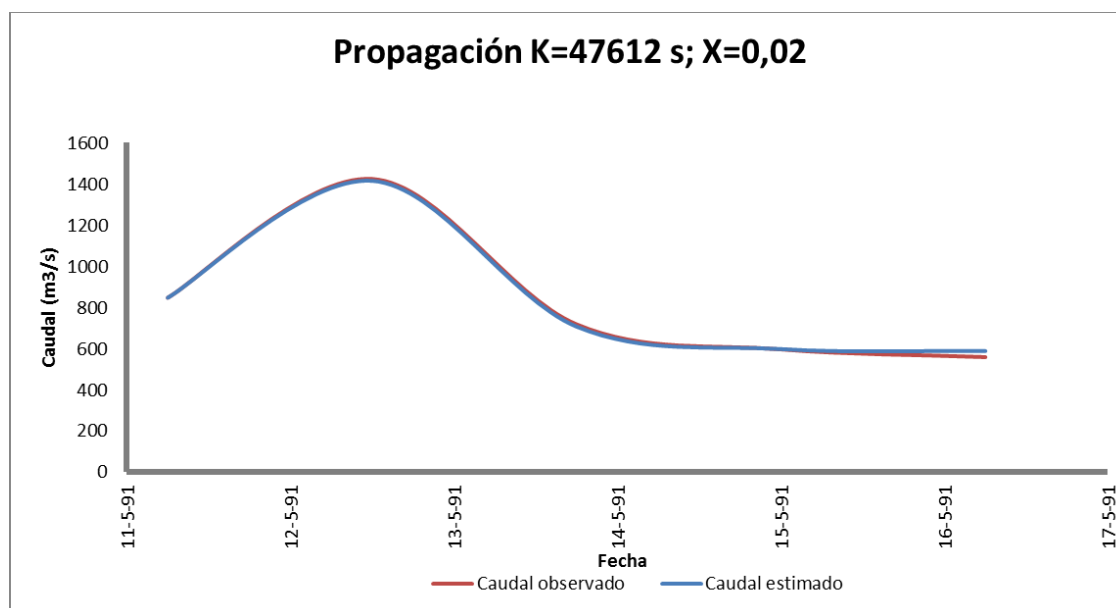


Figura 28: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de mayo de 1991.

4.3.7 Avenida de diciembre de 1992

Esta avenida también fue utilizada para el proyecto final de post-grado “Análisis del tránsito de avenidas del Ebro entre Castejón y Zaragoza” y, por ello, se disponía de Limnigrama digitalizado.

Para calcular los hidrogramas se utilizaron la curva de gastos I (para los datos previos al 11 de diciembre de 1992) y J (para los datos del 11 de diciembre de 1992 y posteriores a estos) (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos H1 (para los datos previos al 14 de diciembre de 1992) y I (para los datos del 14 de diciembre de 1992 y posteriores a estos) (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenidos los hidrogramas, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 180.000 segundos (2 días y 2 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 180.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 11. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una propagación bastante pobre, ya que a pesar de estimar muy precisamente el valor del caudal pico y el tiempo de propagación, no se puede decir lo mismo con el resto de valores (Figura 29).

K (segundos)	150.490	X	0,17
--------------	---------	---	------

Tabla 11: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de diciembre de 1992.

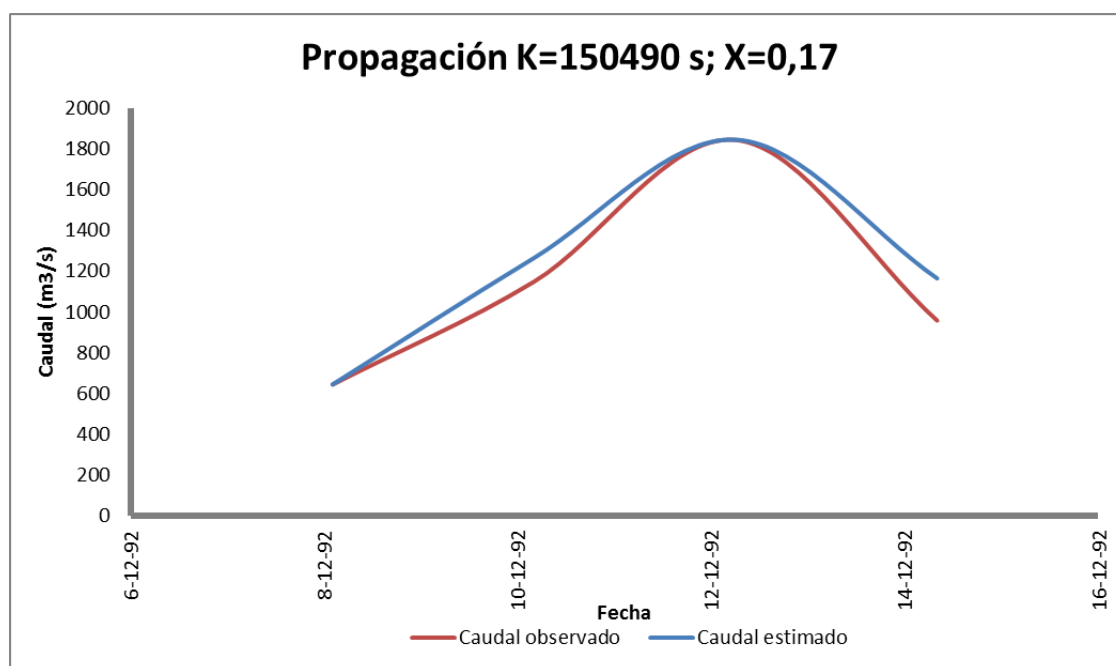


Figura 29: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1992.

4.3.8 Avenida de diciembre de 1993

Al ser utilizada para el proyecto final de post-grado “Análisis del tránsito de avenidas del Ebro entre Castejón y Zaragoza”, de esta avenida también se disponía de Limnigrama digitalizado.

Para calcular los hidrogramas se utilizaron la curva de gastos J (para los datos previos al 29 de diciembre de 1993) y K (para los datos del 29 de diciembre de 1993 y posteriores a estos) (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos I (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Después de haber obtenido los hidrogramas, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 205.200 segundos (2 días y 9 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 205.200 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 12. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una estimación relativamente buena, ya que sólo se aprecia una cierta disparidad para los valores de la cola de los hidrogramas (Figura 30).

K (segundos)	170.488	X	0,11
--------------	---------	---	------

Tabla 12: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de diciembre de 1993.

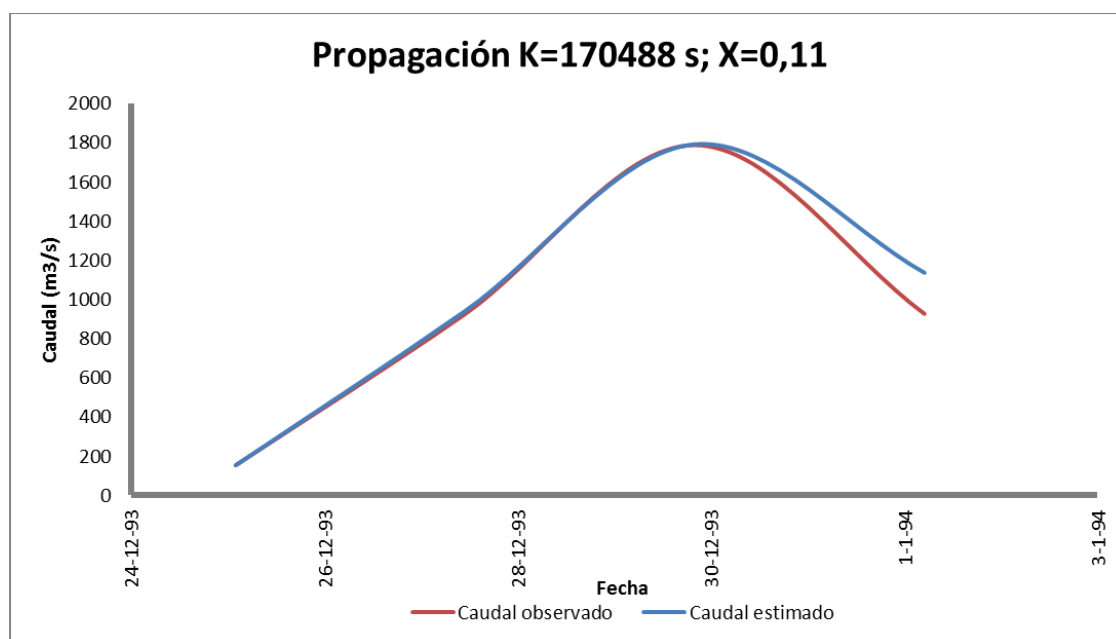


Figura 30: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de abril de 1993.

4.3.8 Avenida de enero de 1997

Esta fue la última avenida de la cual el SAIH no dispone de datos, y al ser utilizada para el proyecto final de post-grado “Análisis del tránsito de avenidas del Ebro entre Castejón y Zaragoza”, únicamente se disponía de Limnigrama digitalizado.

Los hidrogramas fueron calculados mediante la curva de gastos M (Tabla 1) para los datos de la estación de aforo de Castejón, y la curva de gastos I (Tabla 2) para la estación de aforo de Zaragoza.

Una vez obtenido los hidrogramas, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 126.000 segundos (1 día y 11 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 126.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 13. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una estimación relativamente buena, ya que sólo se aprecia una cierta disparidad para los valores de la cola de los hidrogramas (Figura 31).

K (segundos)	157.173	X	0,16
--------------	---------	---	------

Tabla 13: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de Enero de 1997.

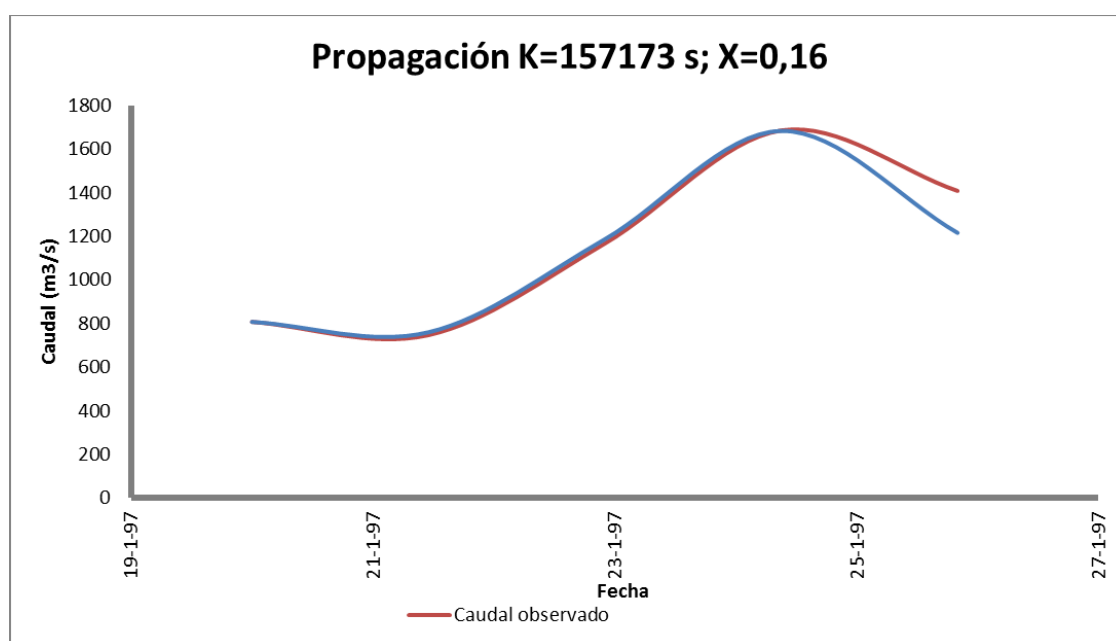


Figura 31: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de enero de 1997.

4.3.9 Avenida de febrero de 2003

Esta avenida fue la primera (de las avenidas del "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón") de la cual el SAIH dispone de datos digitales y, en consecuencia, de inicio se disponen de los hidrogramas de ambas estaciones.

Sin embargo, al coincidir dicha avenida con un periodo de cambio de curva de gastos de la estación de Castejón, fue necesario recalcular el hidrograma a partir del limnigrama, para todos los datos posteriores al 7 de febrero de 2003 (éste incluido) mediante la curva de gastos Q1 (Tabla 1).

Una vez obtenido el hidrograma corregido, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 261.000 segundos (3 días y 30 minutos), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 261.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 14. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una estimación relativamente buena, ya que al contrario de lo que ocurre en el caso anterior, sólo se observan diferencias apreciables entre ambos hidrogramas en los primeros valores de éste (Figura 32).

K (segundos)	202.947	X	0,41
--------------	---------	---	------

Tabla 14: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2003.

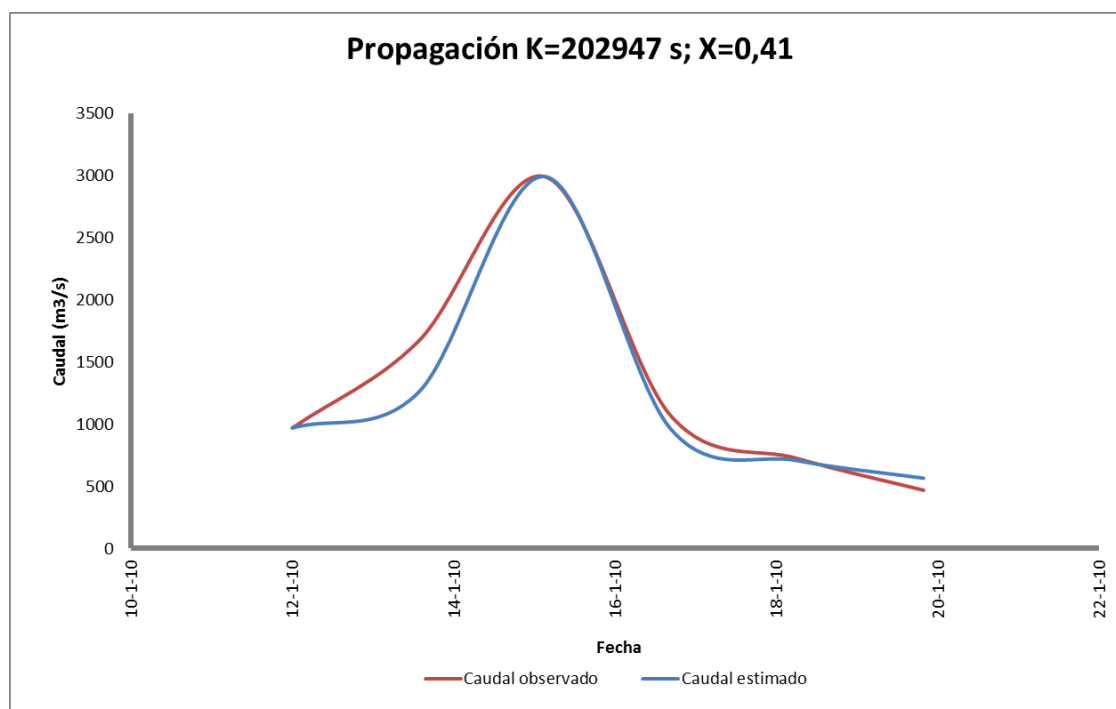


Figura 32: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de febrero de 2003.

4.3.10 Avenida de marzo de 2007

Al ser posterior a febrero de 1997, se disponían para esta avenida de los hidrogramas digitalizados por el SAIH. Además, al no coincidir con el cambio de curva de gastos de ninguna de las dos estaciones de aforo, no ha sido necesario corregir los hidrogramas.

Así pues, se procedió a ajustar mediante el método gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 122.400 segundos (1 día y 10 horas), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 122.400 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 15. Para estos parámetros e intervalo de tiempo se obtiene una estimación bastante buena, donde sólo se aprecian pequeñas diferencias en la rama de subida de ambos hidrogramas (Figura 33).

K (segundos)	90.322	X	0,16
--------------	--------	---	------

Tabla 15: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2003.

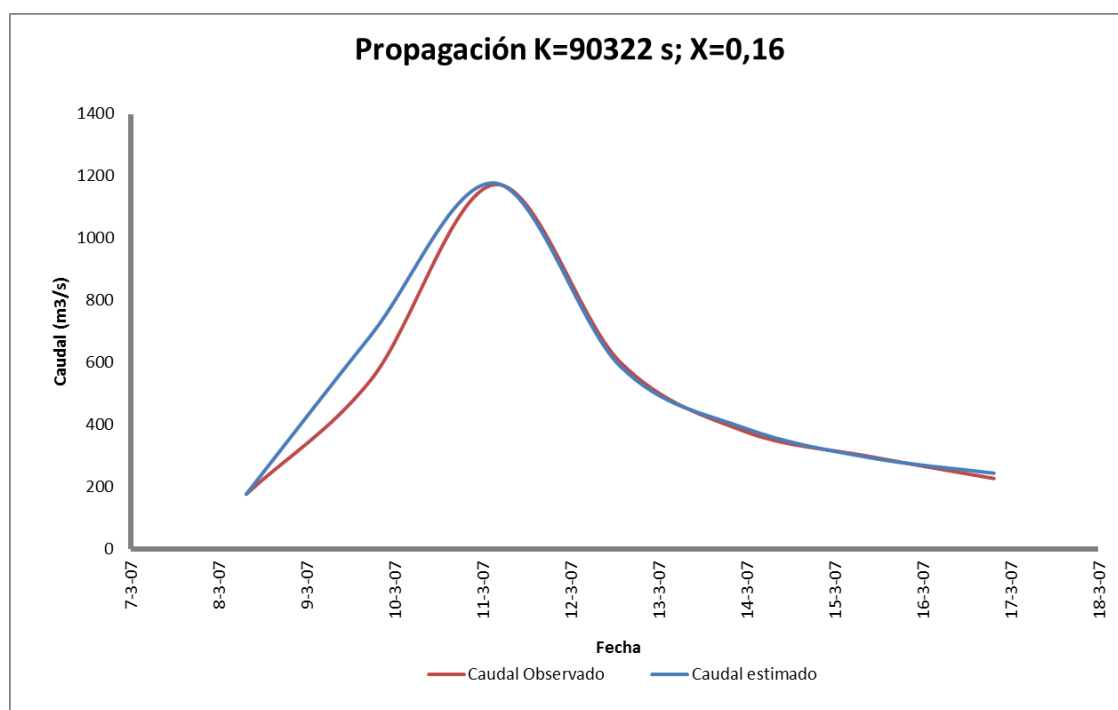


Figura 33: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de marzo de 2007.

4.3.11 Avenida de junio de 2008

Al ser posterior a febrero de 1997, se disponían para esta avenida de los hidrogramas digitalizados por el SAIH. Sin embargo, el período durante el cual se produce esta avenida coincide con el cambio de curva de gasto en la estación de aforo de Castejón, de manera que es necesario corregir el hidrograma correspondiente a la estación de aforo de Castejón. En concreto, se ha utilizado la curva de gastos Q3 (Tabla 1) para corregir los datos del hidrograma posteriores al 7 de junio de 2008 (éste incluido) .

Así pues, se procedió a ajustar mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 156.600 segundos (1 día, 19 horas y 30 minutos), la mejor propagación se obtiene con un intervalo de tiempo de 156.600 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 16. Esta estimación es bastante pobre e imprecisa, sólo se consigue estimar adecuadamente el valor del caudal pico, y parcialmente el tiempo de propagación, obteniéndose resultados bastante mediocres para el resto de resultados (Figura 34).

K (segundos)	166.632	X	0,07
--------------	---------	---	------

Tabla 16: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de junio de 2008.

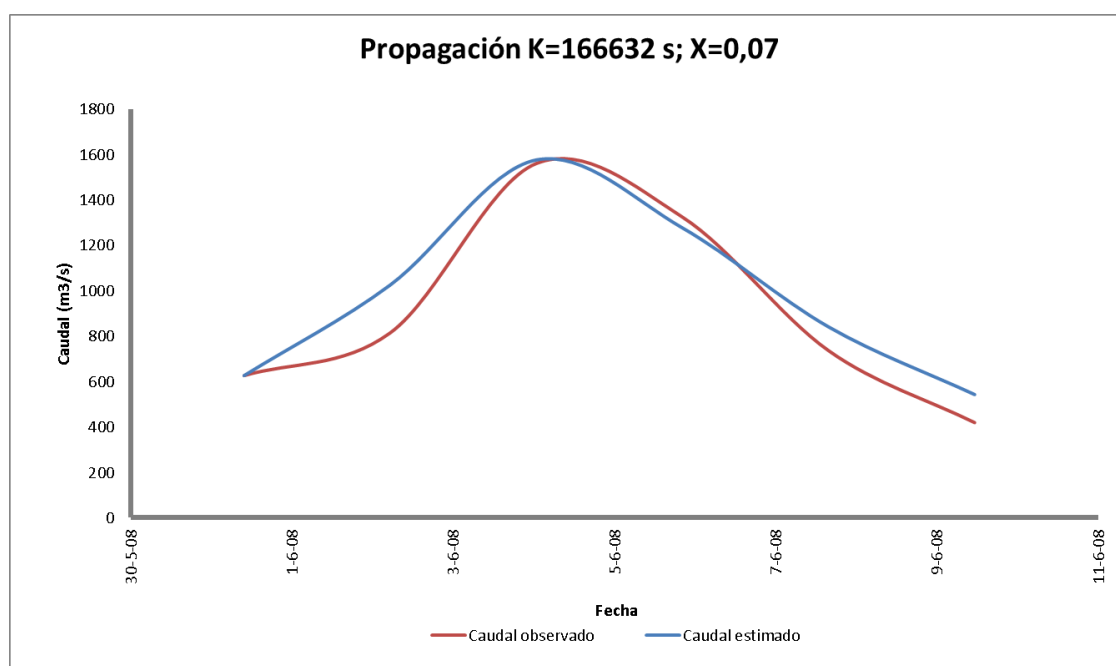


Figura 34: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de junio de 2008.

4.3.12 Avenida de febrero de 2009

Al ser posterior a febrero de 1997, se disponían para esta avenida de los hidrogramas digitalizados por el SAIH. Sin embargo, el período durante el cual se produce esta avenida coincide con el cambio de curva de gasto en la estación de aforo de Zaragoza, de manera que es necesario corregir el hidrograma correspondiente a la estación de aforo de Zaragoza. En concreto, se ha utilizado la curva de gastos M (Tabla 2) para corregir los datos del hidrograma posteriores al 16 de febrero de 2009 (éste incluido).

Una vez obtenido el hidrograma corregido, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 133.200 segundos (1 día y 13 horas), el hidrograma propagado que se ajusta mejor al observado en la estación de aforo de Zaragoza se obtiene con un intervalo de tiempo de 133.200 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 17. Esta estimación es bastante buena, obteniéndose un valor bastante ajustado tanto para el caudal pico como para el resto de valores, así como el tiempo de propagación de la avenida (Figura 35).

K (segundos)	125.220	X	0,42
--------------	---------	---	------

Tabla 17: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de febrero de 2009.

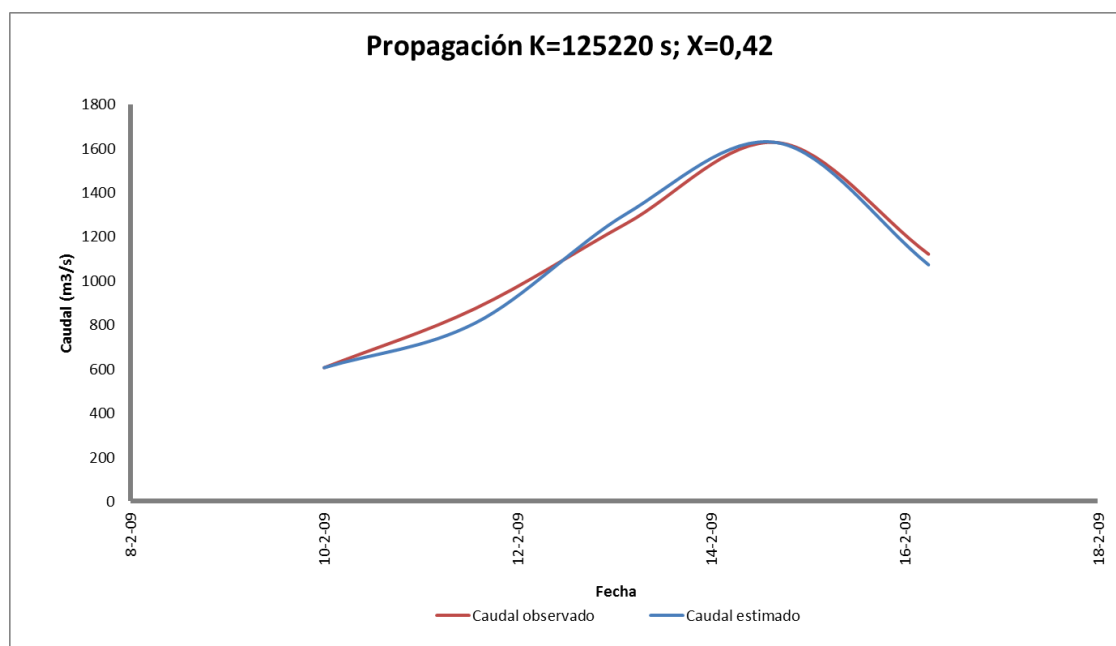


Figura 35: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de febrero de 2009.

4.3.13 Avenida de enero de 2010

Al ser posterior a febrero de 1997, se disponían para esta avenida de los hidrogramas digitalizados por el SAIH. Sin embargo, fue necesario corregir el hidrograma de la estación de aforo de Zaragoza ya que durante la avenida se produce un cambio de curva de gasto en la estación de Zaragoza. En concreto, se corrigieron los valores posteriores al 18 de enero de 2010 (éste incluido) mediante la curva de gastos N1 (Tabla 1).

Una vez obtenido el hidrograma corregido, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 169.200 segundos (1 día y 23 horas), el hidrograma propagado que se ajusta mejor al observado en la estación de aforo de Zaragoza se obtiene con un intervalo de tiempo de 135.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 18. Esta estimación es bastante buena, ya que se producen muy pocas variaciones entre los caudales estimados y los observados (Figura 36).

K (segundos)	113889	X	0,42
--------------	--------	---	------

Tabla 18: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 2010.

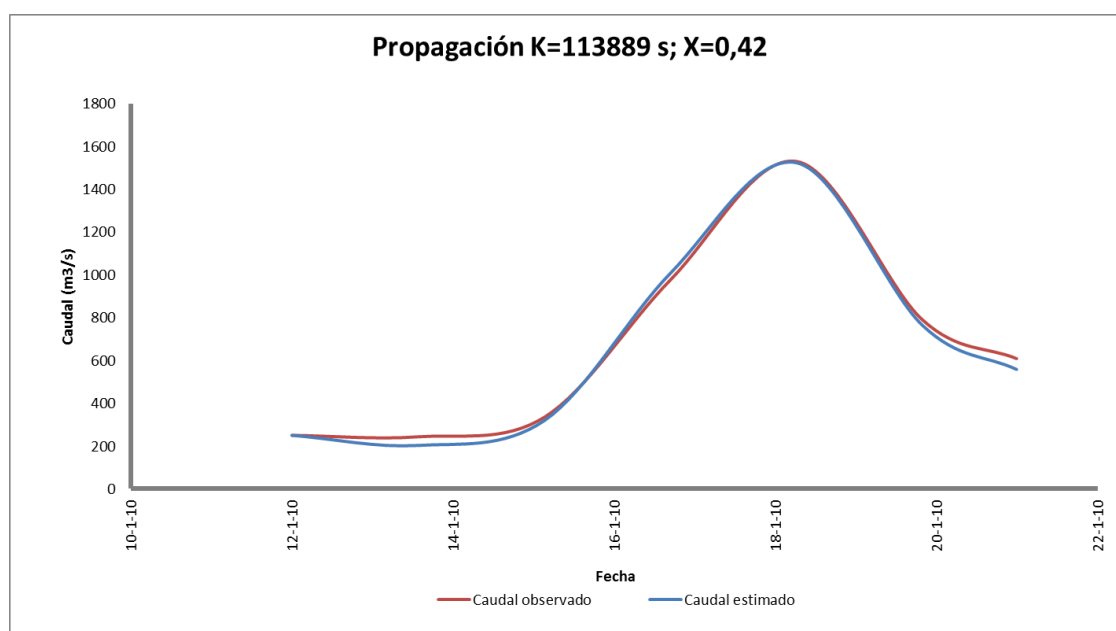


Figura 36: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de enero de 2010.

4.3.14 Avenida de enero de 2013

Al ser posterior a febrero de 1997, se disponían para esta avenida de los hidrogramas digitalizados por el SAIH. Sin embargo, el período durante el cual se produce esta avenida coincide con el cambio de curva de gasto en la estación de aforo de Zaragoza, de manera que es necesario corregir el hidrograma correspondiente a la estación de aforo de Zaragoza. En concreto, se ha utilizado la curva de gastos N5 (Tabla 2) para corregir los datos del hidrograma posteriores al 24 de enero de 2013 (éste incluido).

Una vez obtenido el hidrograma corregido, se ajustaron mediante el modo gráfico los parámetros del método de Muskingum. Para esta avenida, cuyo tiempo de propagación es de aproximadamente 180.000 segundos (2 días y 2 horas), el hidrograma propagado que se ajusta mejor al observado en la estación de aforo de Zaragoza se obtiene con un intervalo de tiempo de 180.000 segundos, para el cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 19. El hidrograma propagado es muy semejante al hidrograma registrado en la estación de aforo de Zaragoza y, por lo tanto, es una estimación bastante buena (Figura 37).

K (segundos)	152.616	X	0,43
--------------	---------	---	------

Tabla 19: Tabla donde se muestran los parámetros del método de Muskingum para la avenida de enero de 2013.

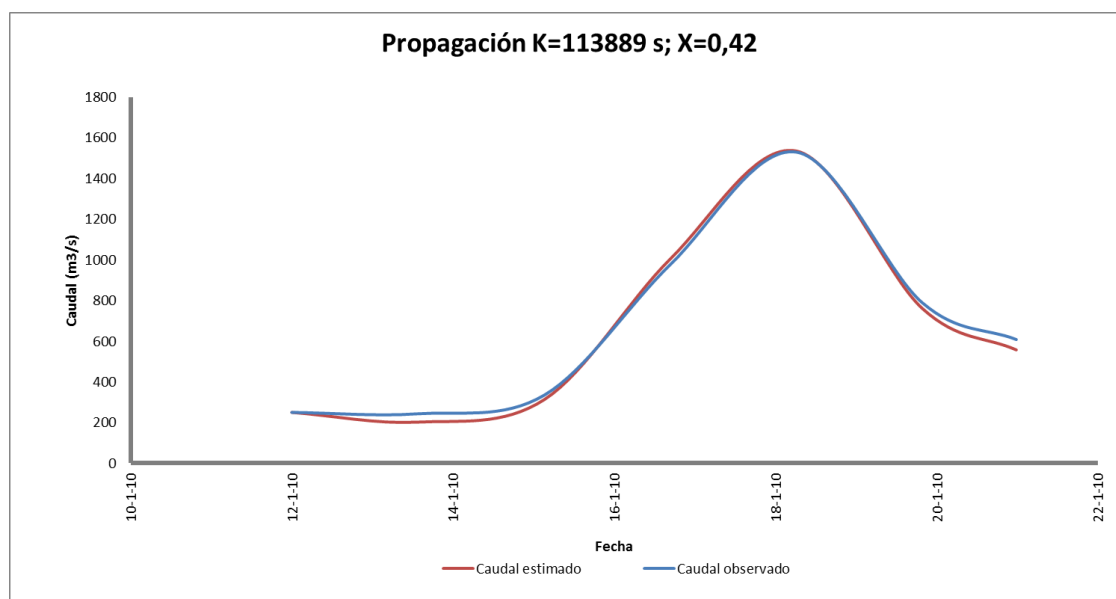


Figura 37: Gráfico donde se muestran los hidrogramas correspondientes al caudal medido en la estación de aforo de Zaragoza (Caudal observado), y el caudal obtenido a partir de la propagación (Caudal estimado) para la avenida de enero de 2013.

4.3.15 Resumen de los parámetros de las avenidas

En la Tabla 20 se muestran, como resumen, los parámetros de Muskingum para las avenidas seleccionadas para realizar el estudio.

Nº	FECHA	K	X	Grupo
5	jun-77	135.060	0,42	Grupo 1
11	abr-87	94.480	0,20	
13	abr-90	78.616	0,35	Grupo 2
14	mar-91	86.331	0,36	
15	abr-91	97.362	0,42	
16	may-91	64.178	0,20	Grupo 3
17	dic-92	150.490	0,17	
18	dic-93	170.488	0,11	
19	ene-97	157.173	0,16	
20	feb-03	202.947	0,41	
21	mar-07	90.322	0,16	Grupo 4
23	jun-08	166.632	0,07	
24	feb-09	125.220	0,42	
25	ene-10	113.889	0,42	Grupo 5
26	ene-13	152.616	0,43	

Tabla 20: Tabla donde se muestran los valores de los parámetros del método de Muskingum para las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro.

5. COMPROBACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se pretende, en primer lugar, describir cuales son los resultados teóricos que "a priori" deberían darse y, posteriormente, comprobar si los datos obtenidos a partir de las avenidas seleccionadas para realizar este estudio corresponden a lo esperado.

Después, se analizará la existencia de avenidas, que no han sido incluidas en el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón", y que hayan podido tener un efector modificador sobre el cauce y, finalmente, se estudiará si se puede establecer una relación entre la velocidad de y tiempo de propagación de una avenida, así como los parámetros K y X del método de Muskingum y el estado de la llera del río, comparando la variación de dichos parámetros para cada uno de los grupos en los que se agrupan las avenidas en el informe anteriormente mencionado, y en los cuales existe una relación constante y estable entre el nivel del río máximo en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza.

5.1 Previsión teórica de los resultados

Como se ha descrito en el 3.2 Significado físico de los parámetros K y X, K es una constante de proporcionalidad entre el volumen almacenado y el caudal, aunque también es interpretado como el tiempo de propagación o tránsito de la avenida²⁹, y, con lo cual, tendrá un valor próximo a éste.

Además, en el mismo apartado, también se explica que, a medida que el caudal máximo de una avenida aumenta, especialmente cuando el río pasa a desbordar, disminuye la velocidad de propagación de la avenida (al haber una mayor parte del caudal que circula por las llanuras de inundación, que oponen una mayor resistencia al flujo), aumentando el tiempo de propagación de la avenida y, debido a la relación entre ambos, también se espera que el parámetro K aumente de valor.

En consecuencia, y considerando que el caudal de un río es proporcional al nivel o calado del propio río, se estima que el tiempo de propagación de la avenida y el parámetro K aumenten a medida que lo hace el caudal o nivel máximo de una avenida (caudal o nivel máximo del punto aguas arriba o aguas abajo que determinan el tramo de estudio de un río, en nuestro caso, Castejón y Zaragoza).

Por lo contrario, teniendo en cuenta que el tiempo de propagación de la avenida es inversamente proporcional a la velocidad de propagación de ésta, se espera que, a medida que se incrementen el caudal o nivel máximo de una avenida, disminuya la velocidad de propagación de dicha avenida.

Intentar pronosticar qué diferencias existirán en estas correlaciones (relación esperada entre caudal y nivel máximo respecto el tiempo de propagación, velocidad de propagación y el parámetro K del método de Muskingum de una avenida) entre cada uno de los grupos o períodos en los que se agrupan las avenidas en el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón" es más difícil.

²⁹ KARAHAN, H. Predicting Muskingum flood routing parameters using spreadsheets. Department of Civil Engineering, Pamukkale University, Turkey. 2009.

Presumiblemente, para cada una de las avenidas de cada grupo en el cual se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza que se mantiene estable, y, considerando que el carácter dinámico del río se pone de manifiesto en episodios de caudales altos (avenidas, en la mayoría de los casos), las correlaciones anteriormente descritas deberían mostrar una tendencia diferenciada para cada grupo de avenidas.

A medida que los sedimentos se depositan en el fondo del río, aumenta el nivel del fondo del río, reduciendo la sección del cauce principal de manera que el río desborda para un caudal menor. Esta situación produce que, para un cierto caudal para el cual el río desborde, una mayor parte del caudal circule por las llanuras de inundación (al reducirse la capacidad del cauce del río), propagándose con una menor velocidad, de manera que la velocidad de propagación de la avenida es menor.

En conclusión, cuanto mayor sea la acumulación de sedimentos y, por lo tanto, el nivel del fondo del río, menor será la velocidad de propagación de la avenida para un mismo caudal (caudal que produzca el desbordamiento del río en una buena parte del tramo de estudio) y, en consecuencia, mayores serán el tiempo de propagación de la avenida y el parámetro K del método de Muskingum de ésta.

La interpretación física del parámetro X es menos concisa, sin embargo, los valores de X próximos a 0 corresponden a avenidas donde hay una importante laminación (atenuación del caudal pico y aumento de la duración de la avenida) mientras que los valores de X cercanos 0.5 corresponden a avenidas donde apenas se observa laminación.

Teóricamente, mayores caudales implican una mayor anegación de las llanuras de inundación, lo que comporta una mayor proporción del caudal circulante lo haga por la llanura (a una menor velocidad), produciéndose una mayor laminación y, por lo tanto, tendrán asociados valores de X próximo a 0.

Además, esta condición se magnifica a medida que se depositan sedimentos en el fondo del río, ya que para un mismo caudal, se incrementa el caudal que transita por las llanuras de inundación, de manera que lo esperable sería que, cuanto mayor sea la acumulación de sedimentos del río, mayor será la laminación que se producirá en una avenida respecto la que se produciría para la misma avenida (mismo hidrograma) con una menor acumulación de sedimentos, y, por lo tanto, se deberían observar valores menores del parámetro X asociados a las avenidas con una mayor laminación.

Esta relación, no obstante, puede presentar una gran variabilidad, debido al comportamiento irregular del flujo en las llanuras de inundación: Un mismo aumento de caudal puede llevar a, principalmente, aumentar la superficie del área anegada o bien, aumentar notablemente el calado de un área ya inundada. Ambas opciones tienen consecuencias bien diferentes, lo que puede generar la gran variabilidad previamente mencionada. En la primera opción aumenta la proporción de caudal que circula a una velocidad inferior respecto al caudal del cauce central y, en la segunda, aumenta la velocidad del caudal que circula por el área inundada, equiparando el comportamiento del caudal circulante por las llanuras de inundación respecto el que lo hace por el cauce central.

Sin embargo, no existe un parámetro que mida la laminación de una avenida. Un factor que, aparentemente, podría representar la laminación de una avenida podría ser la diferencia entre los caudales máximos observados en las estaciones Castejón y Zaragoza, o bien, la anterior diferencia dividida entre uno de los dos caudales máximos (ya que no es lo mismo una laminación equivalente a una reducción del caudal pico en $100 \text{ m}^3/\text{s}$ para una avenida cuyo caudal pico en la estación de Castejón es de $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ que para una de $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$).

En el análisis del parámetro X se deberá tener especial atención a las avenidas que hayan podido tener una aportación adicional de caudal notable durante el tramo del río entre Castejón y Zaragoza, ya sea mediante caudal aportado por algunos de los afluentes de dicho tramo (el río Jalón y Arba son los más caudalosos y, por ende, susceptibles de aportar un caudal significativo al río en dicho tramo) o consecuencia de las precipitaciones notables en las zonas próximas al cauce del río.

5.2 Análisis de los resultados

Previamente a analizar el comportamiento que pueda tener cada uno de los grupos, se comparan los resultados con los esperados teóricamente, sin entrar a valorar a que grupo pertenecen, es decir, se procede a comprobar si los parámetros representativos (laminación, relación entre caudal máximo y el parámetro K, tiempo de propagación y velocidad de propagación, valor del parámetro X, etc.) de todas las avenidas corresponden a los valores o tendencias que se han pronosticado.

En primer lugar, analizamos la relación que presentan los caudales máximos observados en las estaciones de aforo de Zaragoza y Castejón de las avenidas seleccionadas para realizar el análisis. Como se puede observar en la Figura 38, existe, como era de esperar, una relación creciente entre el caudal máximo medido en la estación de aforo de Castejón y el medido en la de Zaragoza.

Además, el hecho que la pendiente de la línea de tendencia sea menor que 1, pone de manifiesto el fenómeno de la laminación en las avenidas (ya que a un caudal máximo observado en Castejón cualquiera le corresponde un caudal máximo observado en Zaragoza menor) a pesar de las posibles aportaciones externas de caudal (afluentes y precipitaciones).

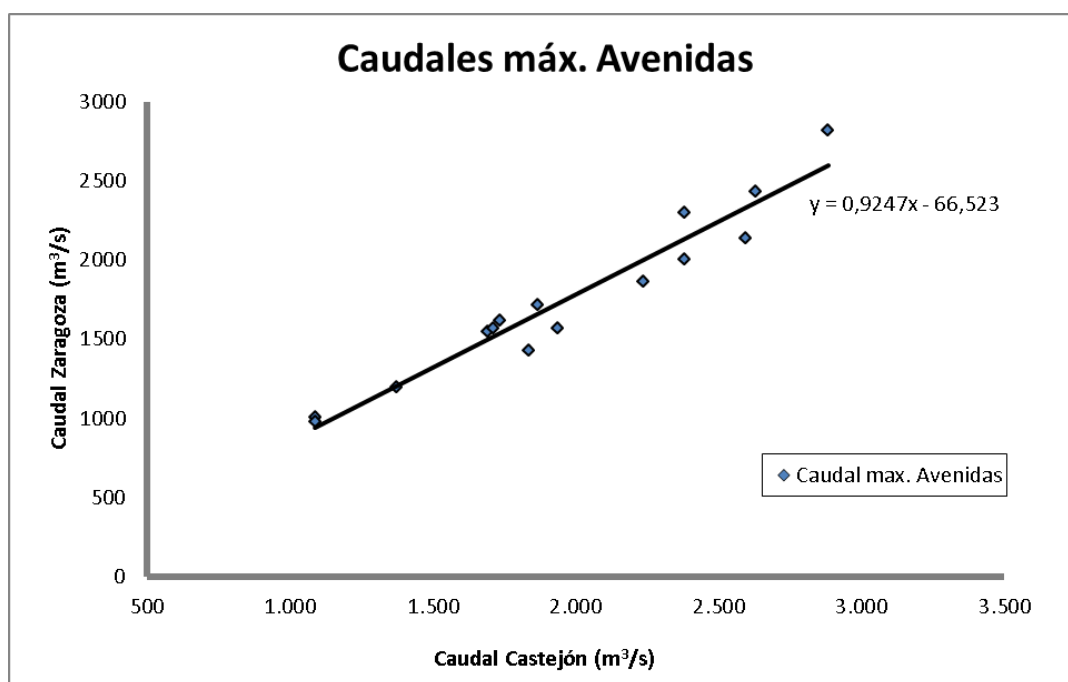


Figura 38: Gráfico que muestra los caudales máximos medidos en la estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para las avenidas, seleccionadas para para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, juntamente con la línea de tendencia de los pares de caudales máximos.

A continuación se analiza como varía el tiempo de propagación de las avenidas en función del caudal o nivel de río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza. Como era de esperar según lo observado anteriormente y a pesar de la dispersión que se observa, el tiempo de tránsito o propagación de la avenida aumenta a medida que lo hacen el caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón o Zaragoza (Figura 39) o bien el nivel máximo del río (Figura 40).

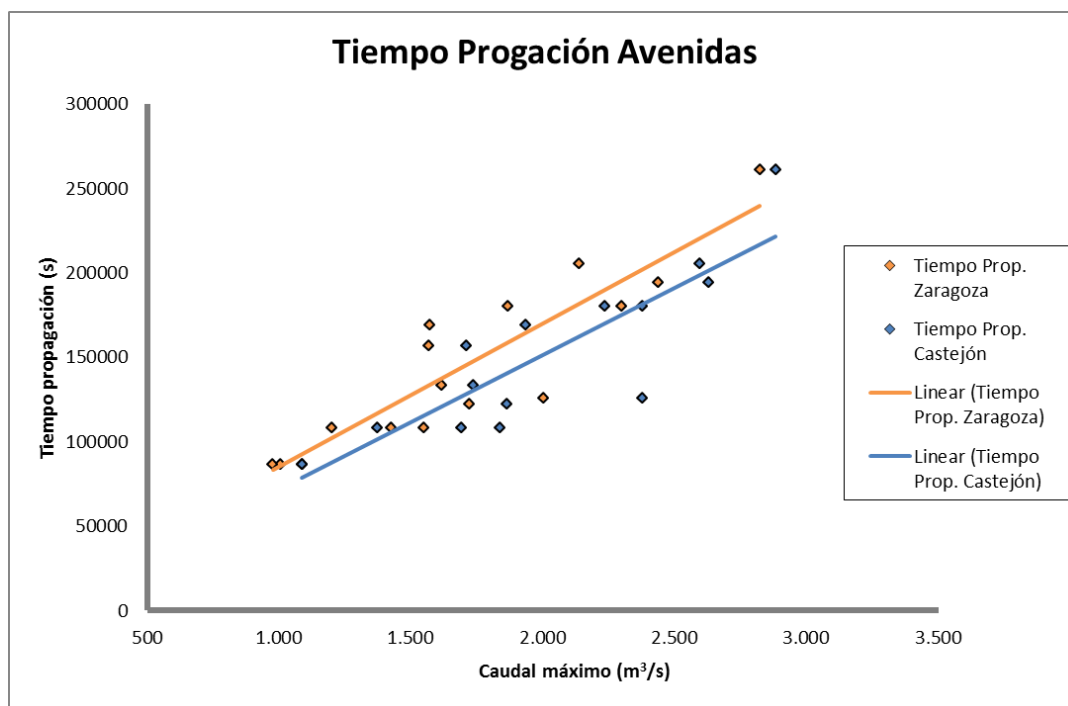


Figura 39: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.

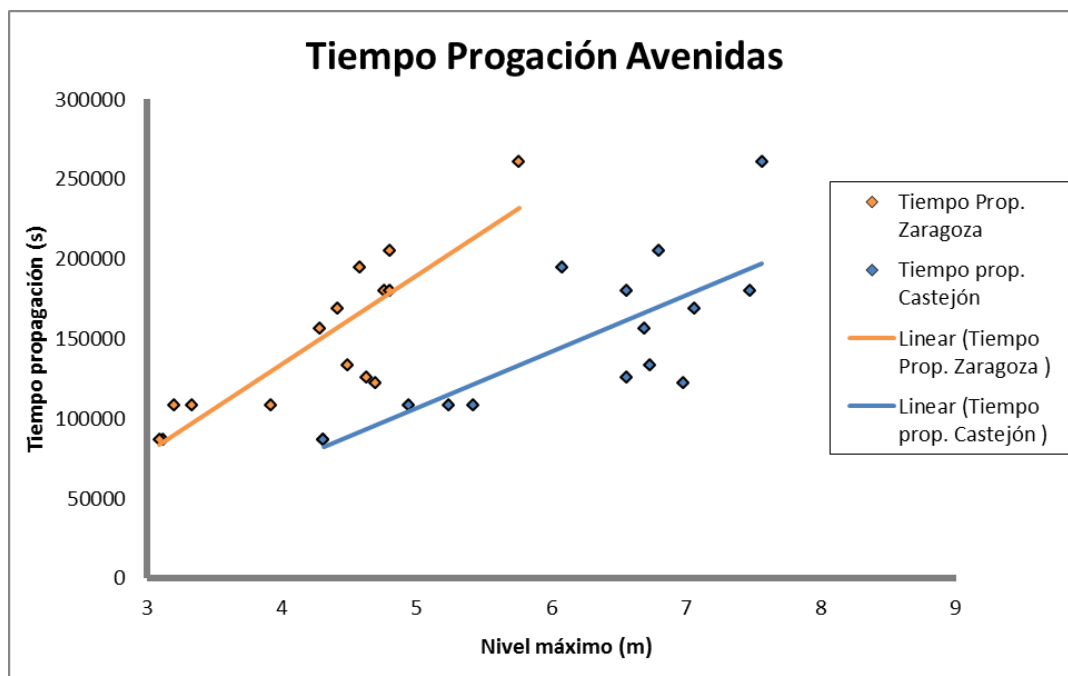


Figura 40: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación en función del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.

Del mismo modo que con el tiempo de propagación de las avenidas, también se ha analizado la relación existente entre el parámetro K del método de Muskingum para los caudales máximos y niveles máximos del río observados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza. Como era de esperar, y aunque como en los casos anteriores, también se observa una cierta dispersión, existe una relación creciente entre el parámetro K del método de Muskingum y el caudal (Figura 41) o el nivel del río máximo observado en ambas estaciones (Figura 42).

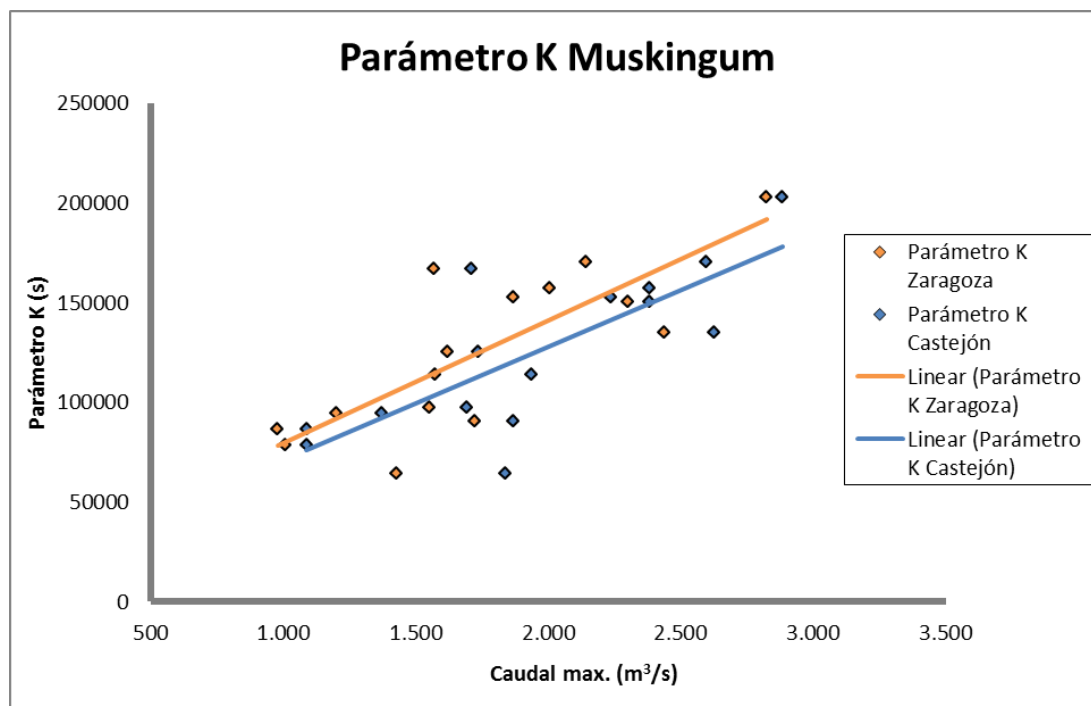


Figura 41: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.

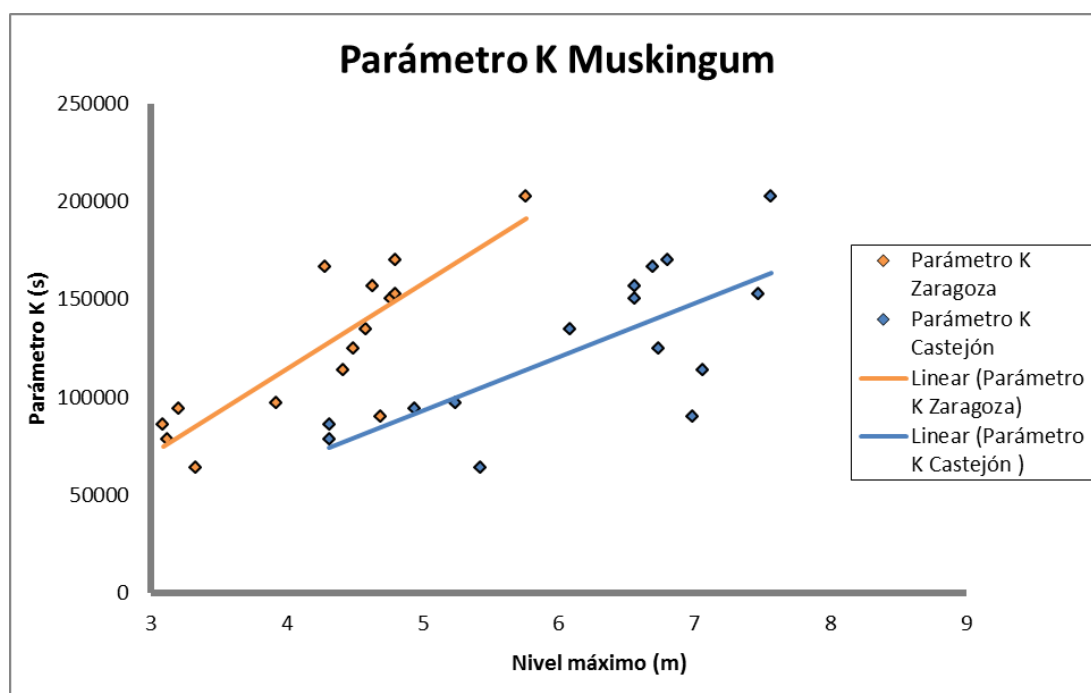


Figura 42: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.

Al igual que los casos anteriores, la relación que se ha observado entre la velocidad de propagación de las avenidas (que para cada avenida se puede calcular como el coeficiente entre la longitud del tramo de río Ebro que se estudia, aproximadamente 141,6 kilómetros, entre el tiempo de propagación de dicha avenida) cumple con las expectativas, a pesar de la dispersión observada, y es inversamente proporcional al el caudal (Figura 43) y nivel del río máximo observado en ambas estaciones (Figura 44).

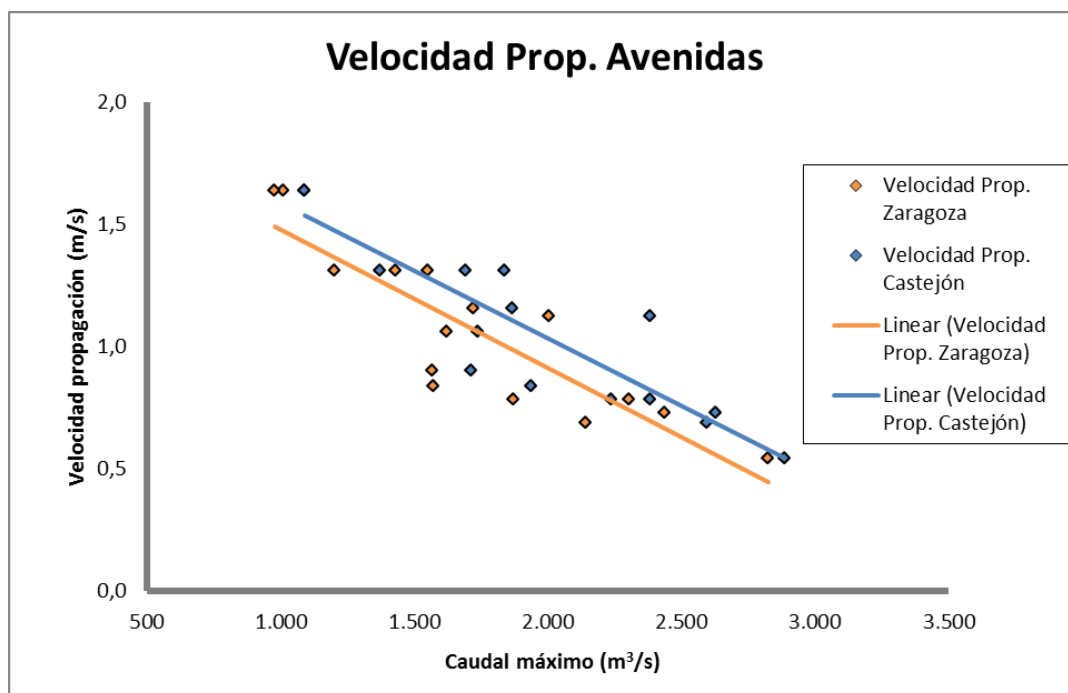


Figura 43: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.

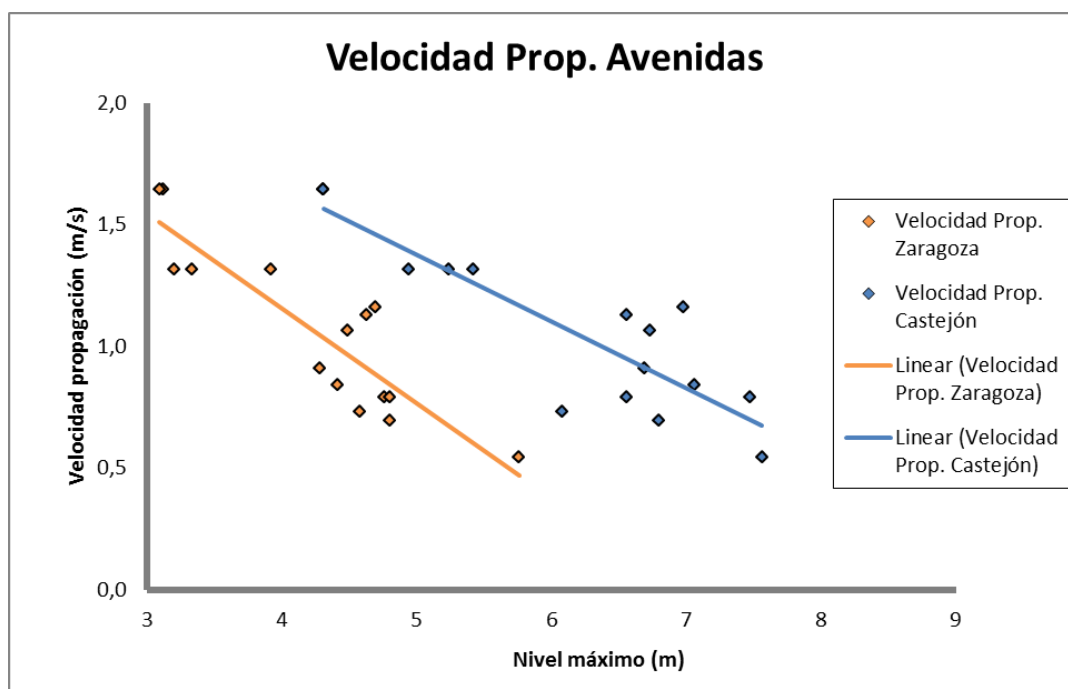


Figura 44: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida en función del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro. Las líneas corresponden a las líneas de tendencia de ambos grupos de datos.

Antes de analizar la relación que guarda el parámetro X con el caudal máximo y nivel máximo del río observado en ambas estaciones de aforo, previamente, procedemos a analizar como varía la atenuación del caudal máximo (que se obtiene como la diferencia entre el caudal punta medido en Castejón y el caudal punta medido en Zaragoza) en función del caudal máximo medidos en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para las avenidas seleccionadas para nuestro análisis.

Si se toman los valores de todas las avenidas, se observa que los datos tienen una gran dispersión entre si y es difícil poder deducir una tendencia clara (Figura 45). Sin embargo, si excluimos aquellas avenidas, mencionadas anteriormente, que muy probablemente hayan recibido aportaciones de caudal no despreciables en el tramo de estudio del río Ebro, se observa una tendencia creciente, aunque con bastante dispersión, entre la atenuación que se produce del caudal pico y los caudales (Figura 46) pico de ambas estaciones. Para este último gráfico se han desestimado las avenidas de junio de 1977, abril de 1990, diciembre de 1992 y febrero de 2003.

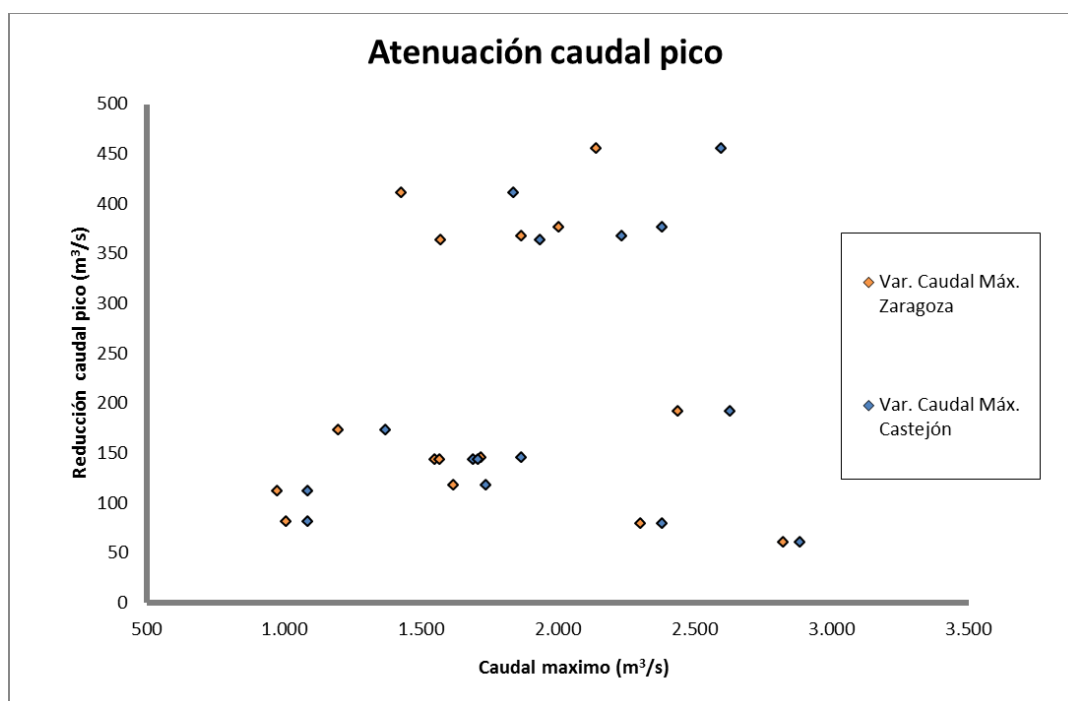


Figura 45: Gráfico que muestra la variación de la reducción del caudal pico de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro.

Del mismo modo, aunque directamente sin considerar las avenidas susceptibles de haber recibido aportes de caudal no despreciables a lo largo del tramo, se ha analizado que, de manera similar al caso anterior y, dentro de la incertidumbre que genera la dispersión de los datos, la atenuación del nivel del río máximo es proporcional a los niveles del río máximos observados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza (Figura 47).

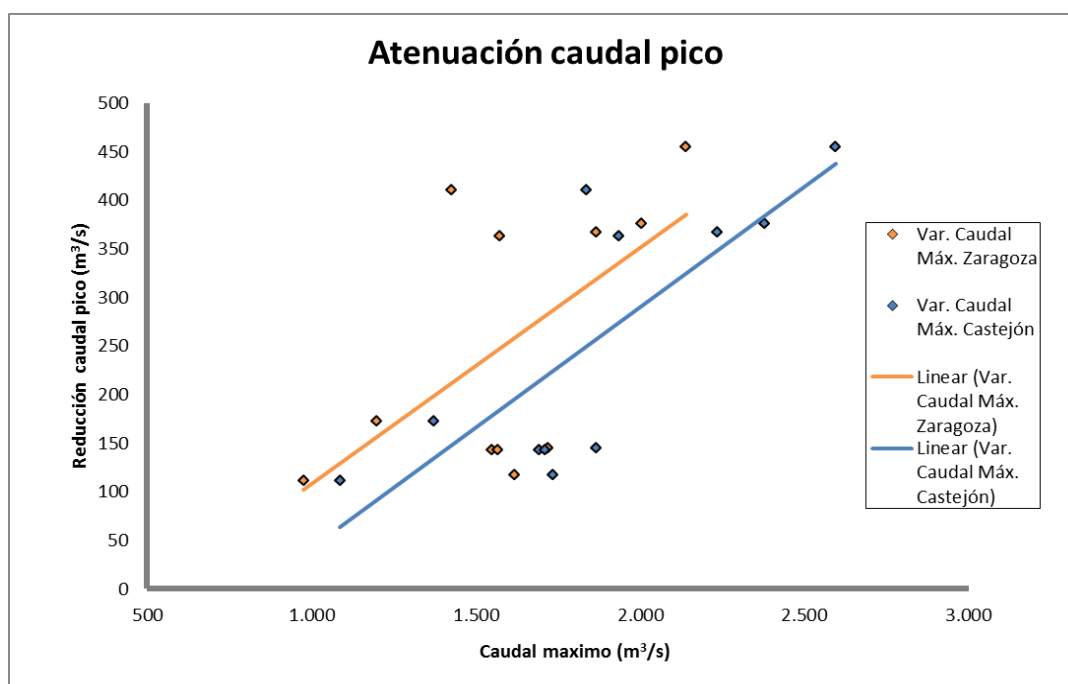


Figura 46: Gráfico que muestra la variación de la reducción del caudal pico de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables.

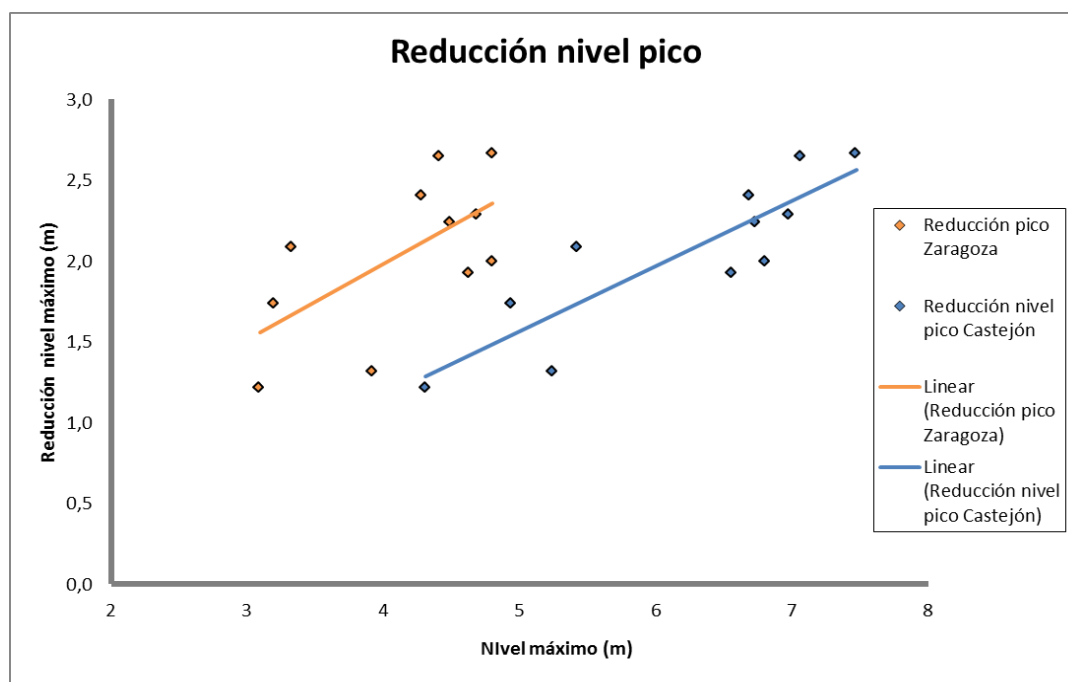


Figura 47: Gráfico que muestra la variación de la reducción del nivel del río pico de una avenida en función del nivel del río máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables.

Una vez examinado la relación existente entre la atenuación de los valores del caudal o nivel del río máximo (resultado de la laminación de las propias avenidas) y los propios, teniendo en cuenta que el valor de X está conectado al fenómeno de la laminación (X tiene valores próximos a 0 para avenidas donde se observa una fuerte atenuación del caudal pico y 0,5 para aquellas en las que no hay prácticamente laminación y, por ende, atenuación del caudal pico), sería de esperar que también se pudiera observar una relación entre el valor del parámetro X y la atenuación del caudal pico, o bien, los propios caudales picos observados en ambas estaciones.

Lejos de observar estos resultados, ya que teóricamente, el parámetro X disminuye desde 0,5 (no hay laminación) hasta 0 (mucho laminación) a medida que aumenta la atenuación del caudal máximo y, considerando que éste aumenta con el caudal máximo observado en cualquiera de las dos estaciones de aforo, el parámetro X debería disminuir con la diferencia de caudales pico observados en ambas estaciones de aforo.

De manera menos directa, (ya que la dispersión que se observa en la relación entre la atenuación del caudal pico y caudales pico, se “propaga” y se magnifica al transformar la relación parámetro X – atenuación del caudal pico, que es la relación debida al significado del parámetro X, a parámetro X – caudal pico), también se debería obtener la misma relación con los caudales picos observados en Castejón y Zaragoza.

Si se analiza la Figura 48, se concluye que, debido a la dispersión y variabilidad de los datos, no se puede apreciar (o bien, sería muy arriesgado) ninguna tendencia en los datos. De la misma manera, los resultados tampoco mejoran si se desprecian aquellas avenidas en las que la laminación no se corresponde con los caudales máximos observados en ambas estaciones (avenidas susceptibles de haber recibido aportes de caudal externos no despreciables) (Figura 49).

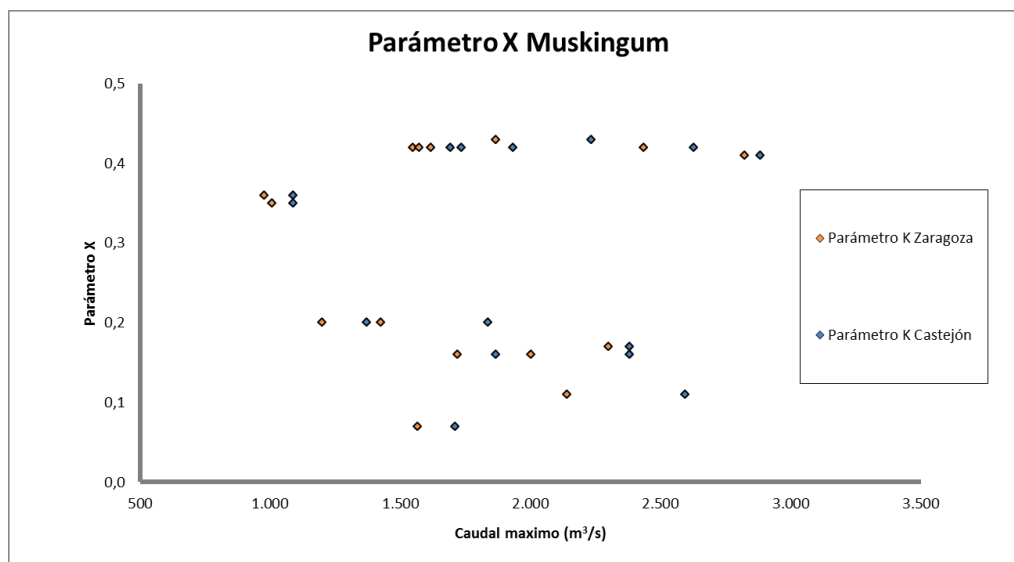


Figura 48: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro.

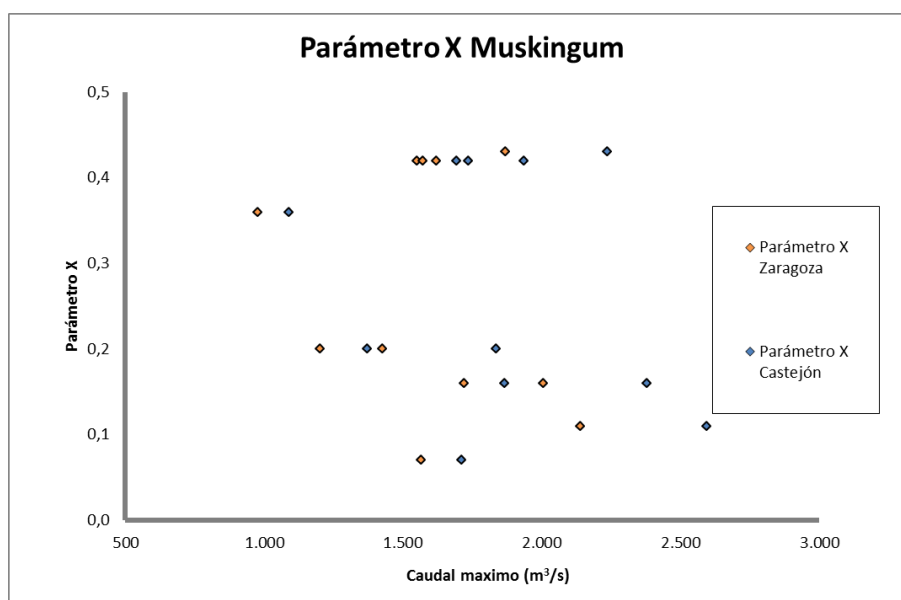


Figura 49: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón (puntos y línea azul) y Zaragoza (puntos y línea naranja) a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables.

Si analizamos la variabilidad del parámetro X del método de Muskingum en función de la atenuación del caudal pico, representada por la diferencia entre el caudal pico observado en Castejón y el observado en Zaragoza, tampoco es observable ninguna tendencia predominante (Figura 50).

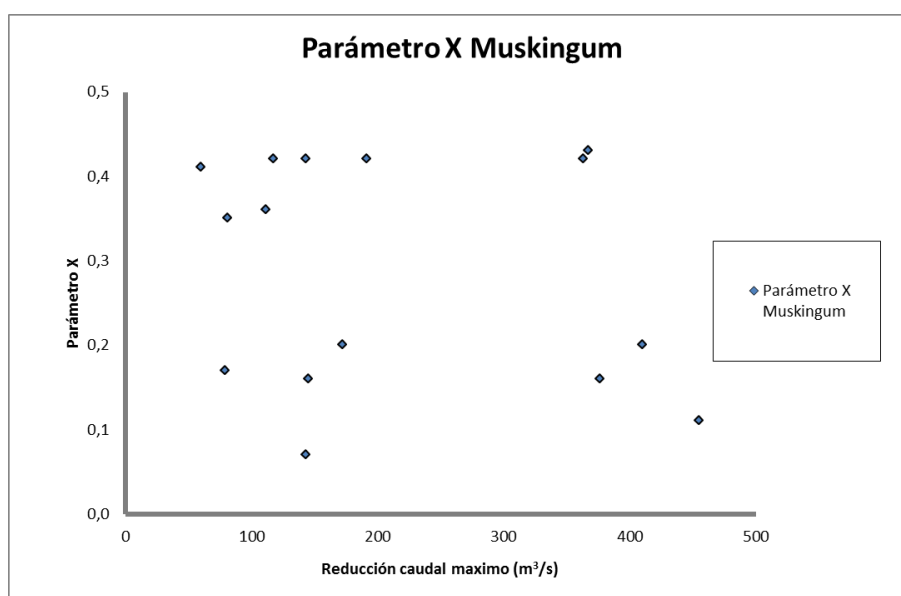


Figura 50: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función de la reducción de caudal máximo, a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro.

Para analizar el porqué de este resultado, es normal que sea difícil apreciar una relación muy exacta entre los caudales pico medidos en ambas estaciones y el parámetro X, debido en primer lugar a los aportes

externos de caudal que, aunque sólo sean notables en algunos casos, existen en todas las avenidas y, segundo, a la variación de la acumulación de sedimentos (y, por lo tanto, del nivel del fondo del río, modificando la laminación que se produciría para una cierta avenida).

Estudiar el origen de la dispersión que se observa en la relación entre atenuación del caudal pico y el parámetro X del método de Muskingum es bastante más complejo, ya que a diferencia del parámetro K, que si dispone de una interpretación física clara y concisa, el parámetro X no dispone de ella. Como se ha explicado antes, se sabe que el parámetro X es cercano a 0 para avenidas donde se aprecia una fuerte laminación mientras que alcanza valores cercanos a 0,5 en la situación contraria. Sin embargo, no hay ninguna expresión o análisis cualitativo que relacione el parámetro X y el fenómeno de la laminación de manera precisa.

Como se ha propuesto antes, un parámetro representativo de la laminación podría ser directamente la reducción del caudal como diferencia entre ambos caudales punta (Ecuación 12). Esto lleva a suponer, sin embargo, que el parámetro X tenga el mismo valor para dos avenidas, cuya caudal punta se reduce en 500 m³/s, aunque sus caudales punta sean diferentes (por ejemplo, 3.000 m³/s y 1.500 m³/s respectivamente), lo que parece, a priori, ilógico.

$$Red_Q = Q_{Castejón} - Q_{Zaragoza}$$

Ecuación 12

Otros parámetros representativos del fenómeno de la laminación que tendrían en cuenta la magnitud de la avenida, serían la reducción del caudal punta, dividido entre cualesquiera de los dos caudales punta observados, en Castejón (Ecuación 13) o Zaragoza (Ecuación 14), o bien, el promedio de ambos (Ecuación 15)(parámetro 4), ya que mediante estos parámetros se relativizaría, respecto la magnitud de la avenida, la reducción del caudal punta.

$$Red_Q = \frac{Q_{Castejón} - Q_{Zaragoza}}{Q_{Castejón}}$$

Ecuación 13

$$Red_Q = \frac{Q_{Castejón} - Q_{Zaragoza}}{Q_{Zaragoza}}$$

Ecuación 14

$$Red_Q = \frac{Q_{Castejón} - Q_{Zaragoza}}{Q_{Promedio}}$$

Ecuación 15

Para examinar si se mejoran los resultados con los parámetros anteriormente descritos, se ha decidido utilizar aquellas avenidas que sufran una atenuación del caudal punta superior al 10% (Tabla 21, en color rojo). Sin embargo, no se aprecian mejores resultados para ninguno de los anteriores parámetros, ya que se han obtenido valores de correlación lineal cercanos a 0.05 (muy bajos, correspondientes a dispersión generalizada) y, por lo tanto, solo podemos afirmar que los parámetros X de las avenidas seleccionadas estiman bien los hidrogramas de Zaragoza, pero, lamentablemente, no se puede ratificar que mantengan su significado físico.

Nº	FECHA	X	Caudal Castejón	Caudal Zaragoza	Reducción Caudal	Porcentaje reducción	Grupo
5	junio-77	0,42	2628,00	2437,00	191,00	0,07	Grupo 1
11	abril-87	0,20	1372,00	1200,00	172,00	0,13	
13	abril-90	0,35	1088,00	1007,00	81,00	0,07	Grupo 2
14	marzo-91	0,36	1088,00	977,00	111,00	0,10	
15	abril-91	0,42	1692,00	1549,00	143,00	0,08	
16	mayo-91	0,20	1.837	1.427	410,00	0,22	Grupo 3
17	diciembre-92	0,17	2.380	2.301	79,00	0,03	
18	diciembre-93	0,11	2.595	2.140	455,00	0,18	
19	enero-97	0,16	2.380	2.004	376,00	0,16	
20	febrero-03	0,41	2.883	2.823	60,00	0,02	
21	marzo-07	0,16	1866,00	1721,00	145,00	0,08	Grupo 4
23	junio-08	0,07	1710,00	1567,00	143,00	0,08	
24	febrero-09	0,42	1736,00	1619,00	117,00	0,07	
25	enero-10	0,42	1935,00	1572,00	363,00	0,19	Grupo 5
26	enero-13	0,43	2235,00	1868,00	367,00	0,16	

Tabla 21: Tabla donde se muestran las avenidas seleccionadas para estudiar la relación entre el parámetro X del método de Muskingum y la laminación, mediante la reducción del caudal punta, correspondientes a las avenidas marcadas en rojo.

5.2.1 Evolución temporal de la velocidad de propagación de las avenidas y los parámetros del método de Muskingum

Antes de analizar la evolución temporal de los parámetros del método de Muskingum así como de la velocidad de propagación de las avenidas, es necesario, como se ha descrito en el apartado 2.3 Características de las avenidas, estudiar la existencia de avenidas importantes cuyo origen (procedencia principal del caudal del río) sea aguas arriba de la confluencia del Ebro con el Aragón.

Para analizar esto, se han analizado los datos mensuales de caudal máximo medido en la estación de aforo de Miranda de Ebro³⁰, una de las que empezó a recoger datos con más anterioridad. Teniendo en cuenta que el caudal dominante en Castejón es de aproximadamente 1.900 m³/s (considerando que el caudal dominante³¹ de Fontellas a Buñuel es de 1.971 m³/s, tramo cercano aguas abajo a Castejón), se

³⁰ Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Anuario de aforos de la estación del río Ebro en Miranda de Ebro. (Disponible en: http://sig.magrama.es/93/ClienteWS/GISROEA/default.aspx?nombre=ROAN_ESTACION_AFORO_RIOS&claves=COD_HIDRO|COD_SITUACION_ESTACION&valores=9001|4)

³¹ Gobierno de Navarra. 2009. Alternativas de actuación frente avenidas en el río Ebro en Fontellas, Cabanillas, Fustiñana, Ribaforada y Buñuel. (Disponible en: <http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/148/218/dinamicafluvialebro.pdf>)

han elegido aquellos meses en los cuales el caudal mensual máximo sea superior a $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ya que, a pesar de ser una caudal mucho menor al caudal dominante del río Ebro en Castejón, es un caudal suficientemente elevado para modificar las características del cauce.

Se analizaron los datos de anuario desde el año hidrológico (de octubre a septiembre de un año gregoriano) 1976-1977 (año correspondiente a la avenida más anterior, dentro de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de los parámetros de la propagación de las avenidas en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza) hasta el año 2010-2011, último del cual se disponen datos.

Se observó que en 15 meses (5 de ellos de forma consecutiva) (Tabla 22) el caudal máximo mensual fue superior a $600 \text{ m}^3/\text{s}$. En particular, excepto en marzo de 2006 y en los meses de diciembre de 2007 a abril de 2008, el resto de meses coinciden con avenidas con aportación importante de los ríos Arga y Aragón y se descarta que puedan tener el efecto “limpiador” que se describe en el apartado 2.3 Características de las avenidas.

Para los eventos de marzo de 2006 y los meses de diciembre de 2007 a abril de 2008, sin embargo, no coinciden con ninguna avenida de las incluidas en el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón".

Para poder confirmar que la mayor parte del aporte de caudal se produce aguas arriba de Miranda de Ebro, se comprueban los caudales mensuales máximos de marzo de 2006 y los meses de diciembre de 2007 a abril de 2008 de las estaciones de aforo del río Arga en Funes³² y del río Aragón en Carrasposo³³, de manera que, para los periodos anteriores, se obtiene un caudal mensual máximo (combinando ambas estaciones) de $1.265,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $889,7 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Esto caudales, mayores que los que se observaron en Miranda de Ebro para estos mismos períodos, indica que, a pesar que una buena parte de la aportación de caudal tiene su origen aguas arriba de Miranda de Ebro, y por lo tanto, transportará una menor cantidad de sedimentos, se ven compensados por la también importante aportación de caudal de los ríos Arga y Aragón, que sí transportará una cantidad abundante de sedimentos y, en consecuencia, estas avenidas no tendrán un efecto “limpiador” como se podría esperar.

³² Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Anuario de aforos de la estación del río Arga en Funes. (Disponible en: http://sig.magrama.es/93/ClienteWS/GISROEA/default.aspx?nombre=ROAN_ESTACION_AFORO_RIOS&claves=COD_HIDRO|COD_SITUACION_ESTACION&valores=9004|4)

³³ Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Anuario de aforos de la estación del río Aragón en Caparroso. (Disponible en: http://sig.magrama.es/93/ClienteWS/GISROEA/default.aspx?nombre=ROAN_ESTACION_AFORO_RIOS&claves=COD_HIDRO|COD_SITUACION_ESTACION&valores=9005|4)

Año	Mes	Caudal máx. mensual (m ³ /s)
78	Febrero	812,32
79	Enero	727,04
80	Diciembre	703,5
92	Diciembre	710,5
93	Diciembre	746,5
2003	Febrero	801,5
2006	Marzo	619
2007	Abril	809,9
2007-2008	Diciembre-Abril	812,32
2009	Febrero	602,98
2010	Enero	606,04

Tabla 22: Tabla donde se muestra el caudal máximo mensual observado en el río Ebro en Miranda de Ebro, para las avenidas en las que se supera el caudal de 600 m³/s en su paso por Miranda de Ebro.

Una vez que hemos comprobado que, a priori, el comportamiento de las avenidas de cada grupo, en el cual se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza se mantiene estable, ha de ser relativamente consistente (con la variabilidad propia de cada avenida) y homogéneo.

En primer lugar, comprobaremos la primera hipótesis realizada, según la cual, a medida que aumenta la deposición de sedimentos, y, como consecuencia, el nivel del fondo del río, para un mismo caudal (que provoque desbordamiento), aumentarán tanto el tiempo de propagación como el parámetro K del método de Muskingum y disminuirá la velocidad de propagación de la avenida.

En la Figura 51 y Figura 52, se muestran la variación del parámetro K del método de Muskingum en función de los caudales pico observados en Castejón y Zaragoza. En ambas figuras, podemos observar:

- La línea de tendencia del grupo 1 corresponde a mayores valores del parámetro K que la del grupo 2, lo que concuerda al hecho que el nivel de fondo (o, al menos, la relación entre el nivel máximo de Castejón y el de Zaragoza) es mayor.

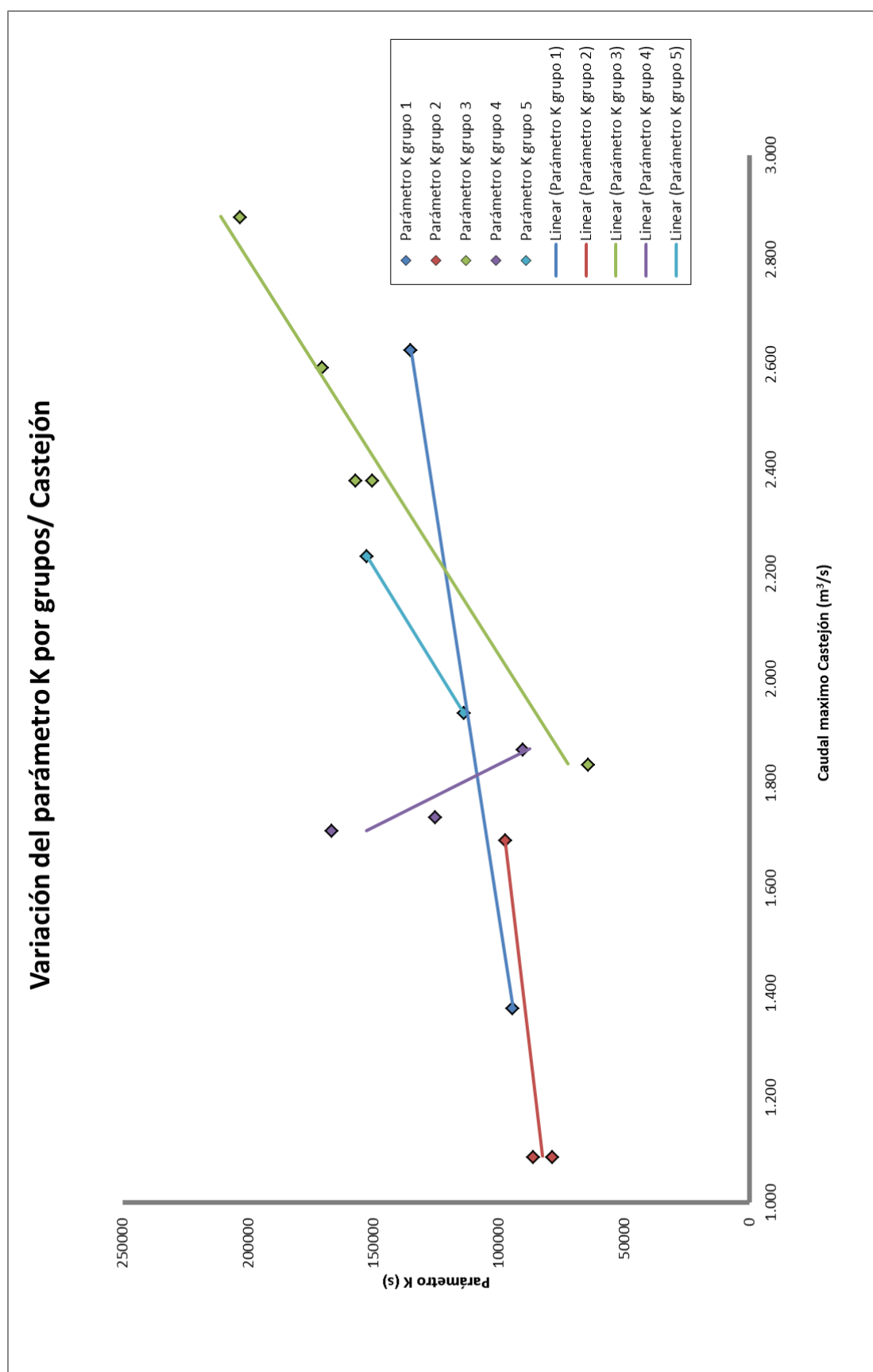


Figura 51: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

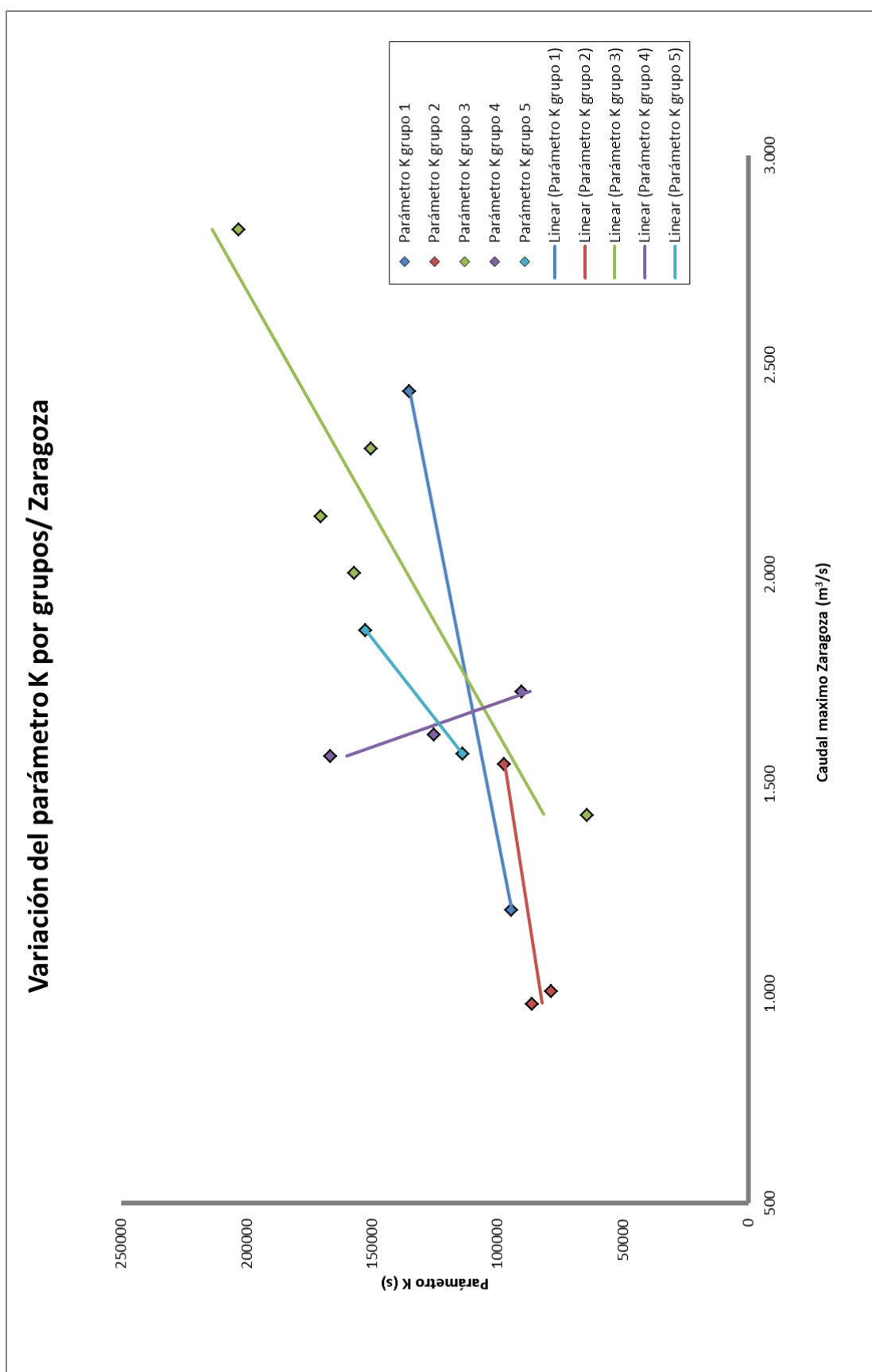


Figura 52: Gráfico que muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

- A partir de un cierto caudal se observa que la línea de tendencia del grupo 3 equivale a mayores valores del parámetro K que la del grupo 1, y en consecuencia, del grupo 2. Esto es coherente con el hecho que la acumulación de sedimentos para el grupo 3 es mayor que para el grupo 1 y 2.
- Las avenidas correspondientes al grupo 4 no son congruentes con el resto de resultados.
- La línea de tendencia del grupo 5 corresponde a valores mayores del parámetro K del método de Muskingum que las líneas de tendencia de los grupos 1,2 y 3, lo que está acorde con el hecho que la que la acumulación de sedimentos para el grupo 3 es mayor que para los grupos 1,2 y 3.

A partir de los puntos anteriores, se puede concluir que, excepto el grupo 4 de avenidas, que tiene un comportamiento opuesto y diferenciado al resto de grupos, la variación del parámetro K del método de Muskingum muestra una relación lógica con la variación del estado del cauce, más concretamente de la acumulación de sedimentos en el fondo del río, aunque se deberían tener más datos para estudiar la intersección de las líneas de tendencia de los grupos 1 y 3.

En la Figura 53 y Figura 54, se muestra la variación del tiempo de propagación de las avenidas en función del caudal pico observado en Castejón y Zaragoza. Se puede apreciar un comportamiento parecido al que se da con el parámetro K del método de Muskingum, lo que pone de manifiesto el significado físico de dicho parámetro K, sin embargo, los datos muestran un grado de dispersión un poco mayor además de que las líneas de tendencia de los grupos no proporcionan una interpretación tan clara como en el caso anterior. En general, en ambas figuras se puede observar que:

- La línea de tendencia del grupo 1 corresponde a mayores valores del tiempo de propagación que la del grupo 2, lo que atiende al hecho que el nivel de fondo (o, al menos, la relación entre el nivel máximo de Castejón y el de Zaragoza) es mayor.
- A partir de un cierto caudal, en este caso, mayor que en el caso del parámetro K del método de Muskingum se observa que la línea de tendencia del grupo 3 representa mayores valores del tiempo de propagación que la del grupo 1 y, por lo descrito en el punto anterior, también del grupo 2, lo que pone de manifiesto que la acumulación de sedimentos correspondiente al grupo 3 es mayor que la del grupo 1 y 2.
- Las avenidas correspondientes al grupo 4 no son congruentes con el resto de resultados.
- La línea de tendencia del grupo 5 corresponde a valores mayores del tiempo de propagación de avenidas que las líneas de tendencia de los grupos 1,2 y 3, lo que está acorde con el hecho que la que la acumulación de sedimentos para el grupo 3 es mayor que para los grupos 1,2 y 3. Sin embargo, que la pendiente de la línea de tendencia del grupo 5 sea menor que la del grupo 3, deja la puerta abierta a que, si se dispusiera de datos de avenidas del grupo 5, cuyos caudales pico fueran mayores ($3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en Castejón, por ejemplo) el tiempo de propagación asociado a dicha avenida sería, según la línea de tendencia observada, menor a la del grupo 3, rompiendo con la correlación entre valor del tiempo de propagación y el estado del cauce. También podría darse que, teniendo en cuenta que sólo se disponen de dos datos para el grupo 5, uno de los dos tenga un comportamiento anómalo, resultando en una línea de tendencia equívoca.

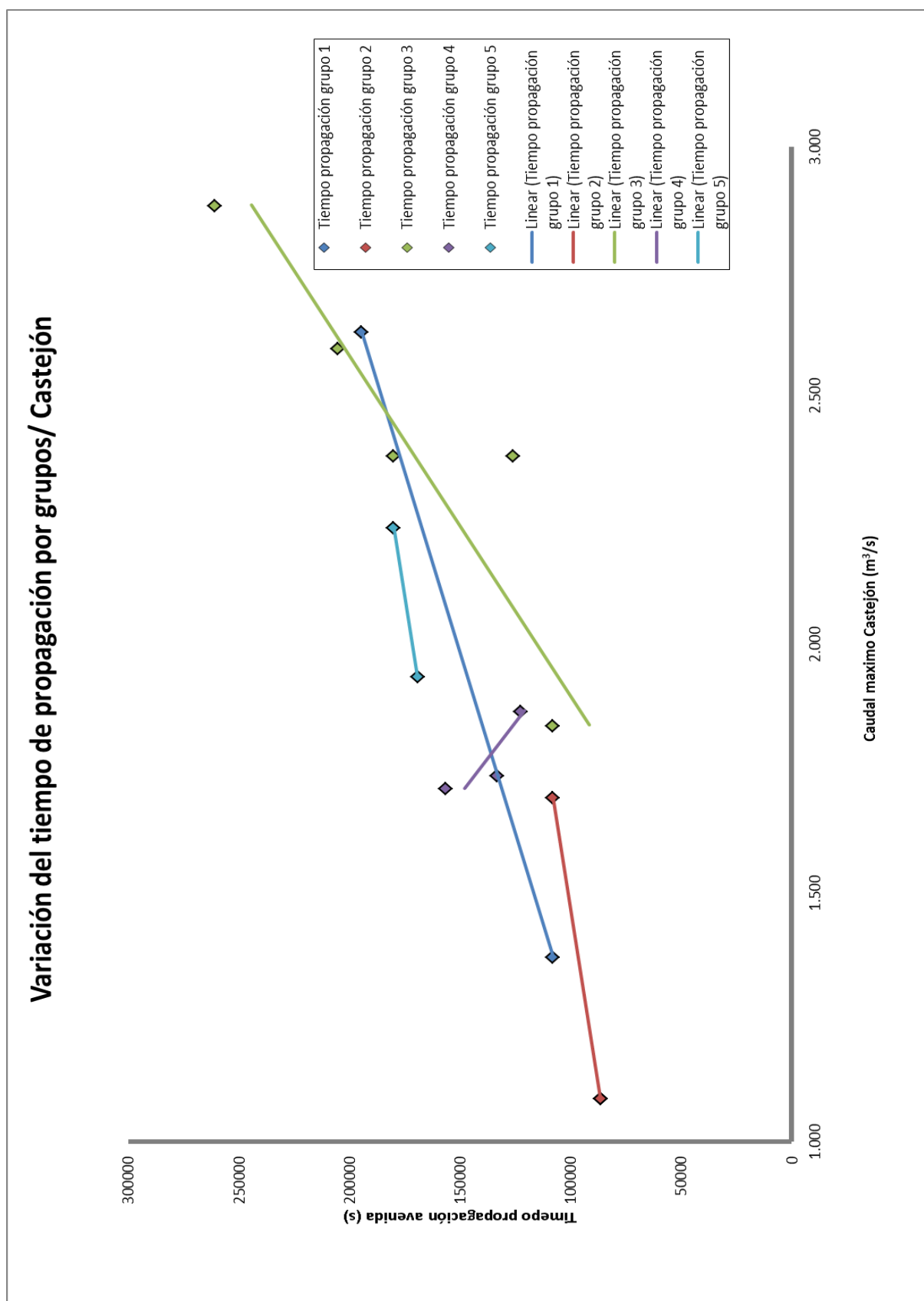


Figura 53: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en la estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

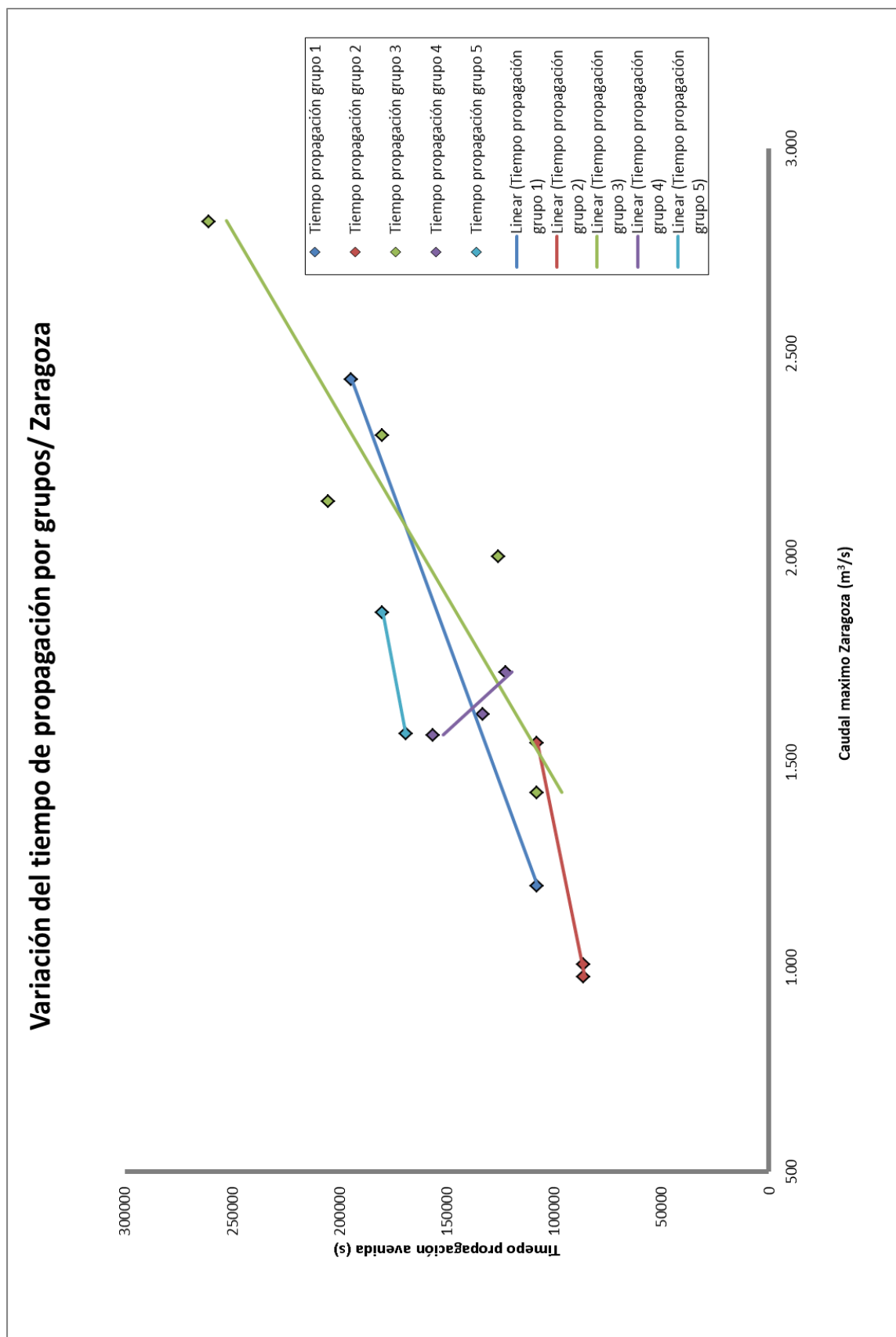


Figura 54: Gráfico que muestra la variación del tiempo de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

Si se analizan los gráficos donde se muestra la variación del parámetro K del método de Muskingum en función de los caudales máximos observados en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza (Figura 51 y Figura 52), se puede llegar a la conclusión de que existe un cierto paralelismo entre el comportamiento de los grupos de avenidas 1 y 2 y entre los grupos de avenidas 3 y 5 (ya que las sus líneas de tendencia son relativas).

Se podría extraer la conclusión que, el paralelismo entre grupos, y, sobre todo, el cambio de comportamiento que se produce entre el grupo 2 y el grupo 3, puede venir dado por los dragados que se llevaron a cabo durante el periodo correspondiente al grupo de avenidas 2. Sin embargo, si se observan los gráficos donde se muestra la variación del tiempo de propagación de una avenida en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza (Figura 53 y Figura 54) se extrae que los paralelismos anteriormente descritos se pierden, aunque se mantiene el cambio de comportamiento entre el grupo 2 y 3.

La variación de la velocidad de propagación de una avenida respecto los caudales punta medidos en las estaciones de aforo de Castejón y Zaragoza para cada grupo de avenidas tendrá una gran semejanza (aunque en un sentido totalmente contrario) con la variación del tiempo de propagación de una avenida respecto los anteriores parámetros, ya que la velocidad de propagación de una avenida se calcula como la longitud del tramo de estudio (141,6 km) entre el tiempo de propagación de una avenida.

Además, también se podría realizar el mismo análisis con las velocidades de propagación de una avenida si se considerarán, atendiendo a su significado físico, el parámetro K del método de Muskingum como un tiempo de propagación, obteniéndose una velocidad de propagación con un origen diferente.

Como se puede observar en la Figura 55, Figura 56, Figura 57 y Figura 58, el comportamiento que se observa para ambas velocidades de propagación (la que se ciñe estrictamente al significado físico de velocidad de propagación y la que se obtiene al considerar el parámetro K del método de Muskingum como un tiempo de propagación) para los diferentes grupos de avenidas es completamente el inverso de los comportamientos observados para el tiempo de propagación de una avenida y el parámetro K del método de Muskingum:

- En ambos casos, la línea de tendencia del grupo de avenidas 1 representa valores de la velocidad de propagación menores que la del grupo 2, lo que corresponde con el hecho que la acumulación de sedimentos en el grupo 1 sea mayor que en el grupo 2.
- En ambos casos, a partir de un cierto caudal, que es mayor para el caso en el que la velocidad de propagación se obtiene a partir del tiempo de propagación de la avenida, los valores de la velocidad de propagación que representan la línea de tendencia del grupo 3 son menores que los del grupo 1, y en consecuencia, que los del grupo 2 (si se prolongará la línea de tendencia del grupo 2 hasta cortar con la del grupo 3).
- En ambos casos, y del mismo modo que para los otros parámetros, los resultados del grupo 4, no son congruentes con el resto de resultados.
- En ambos casos y para los caudales máximos observados en Castejón o Zaragoza indistintamente, los valores de la velocidad de propagación que corresponden a la línea de tendencia del grupo 5 son menores que los del resto del grupo, lo que está acorde con el hecho que el grupo 5 tiene la mayor acumulación de sedimentos (y por lo tanto, nivel de fondo del río) de todos los grupos.

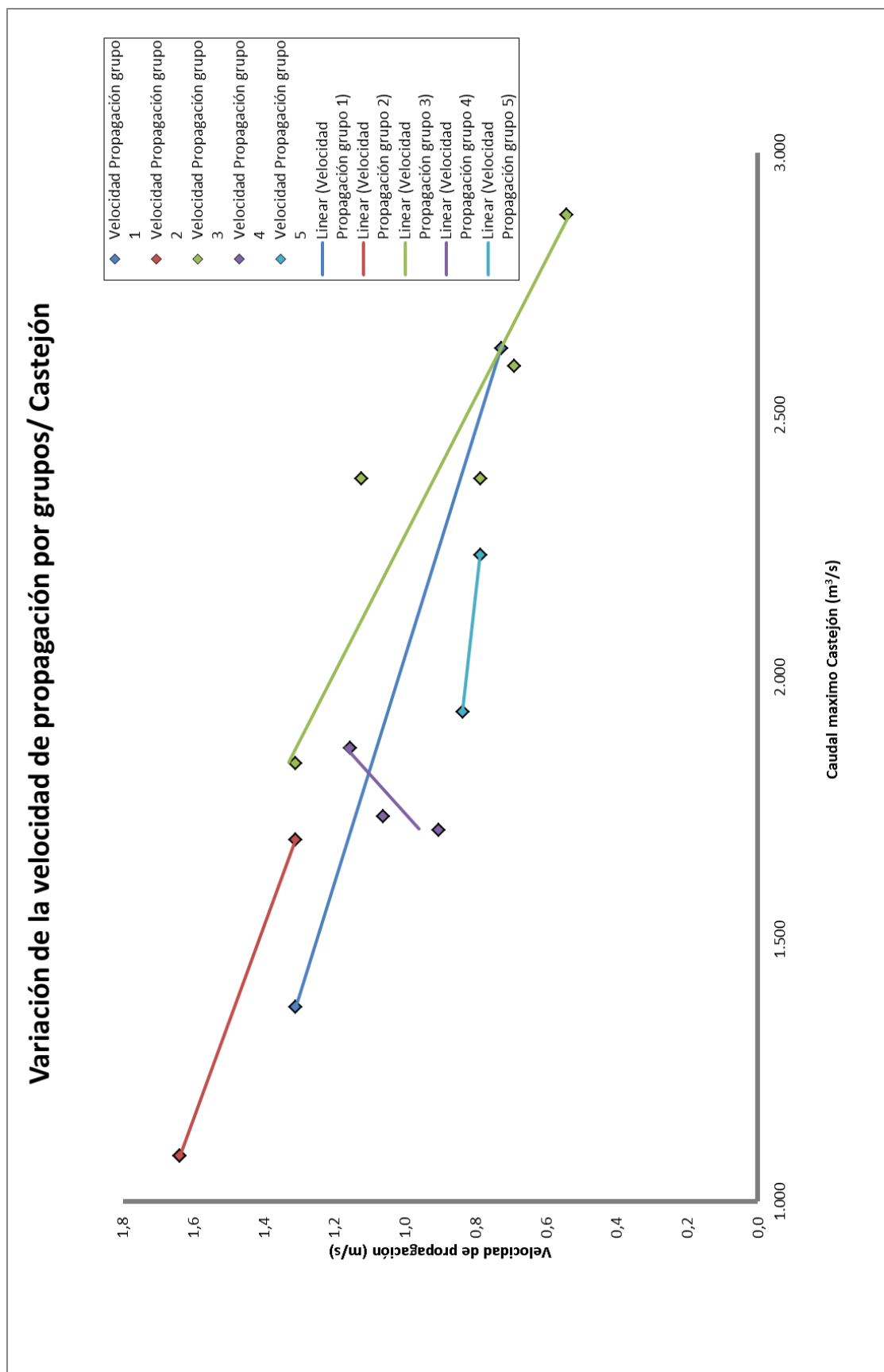


Figura 55: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del tiempo de propagación, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

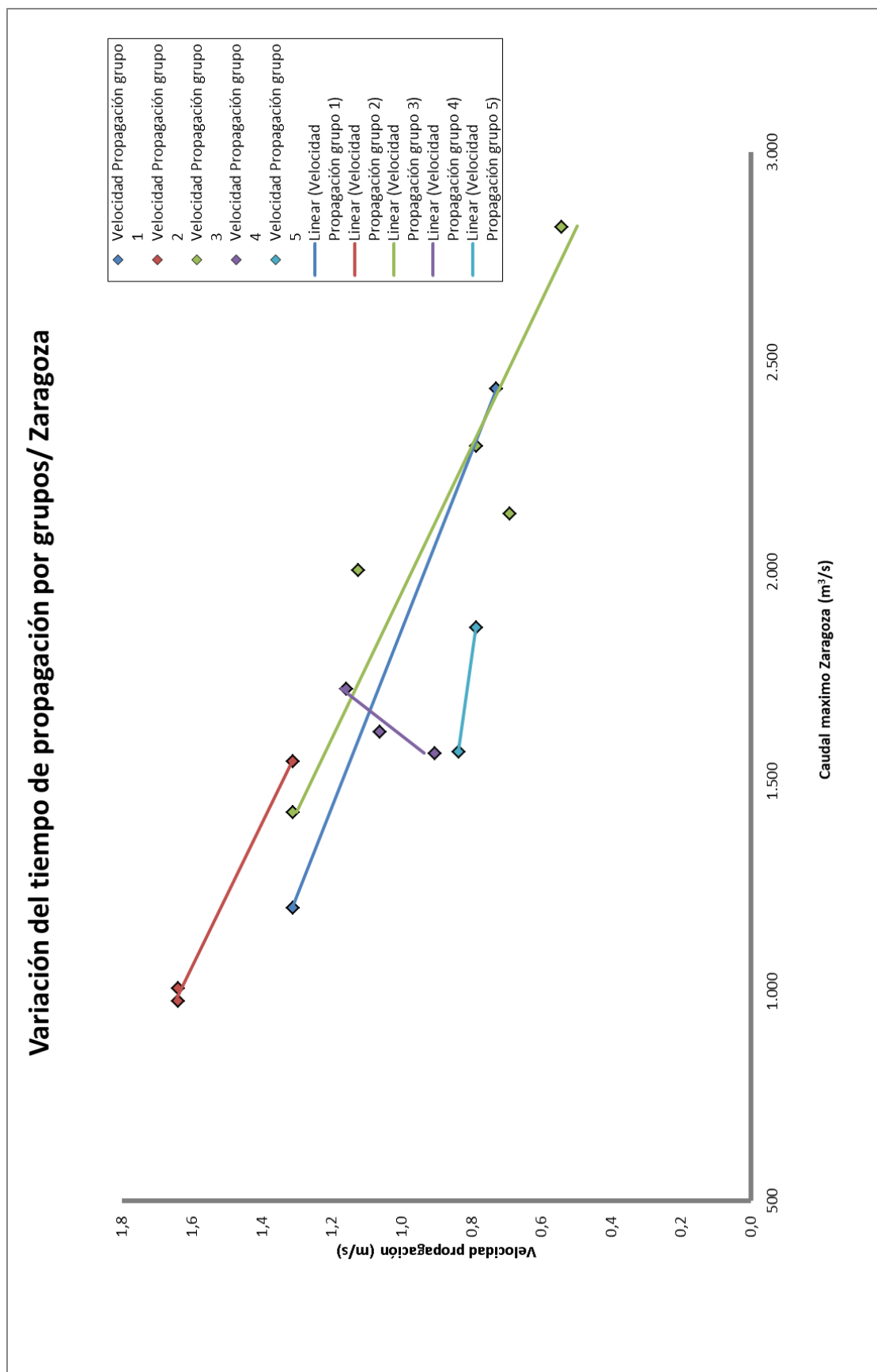


Figura 56: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del tiempo de propagación, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

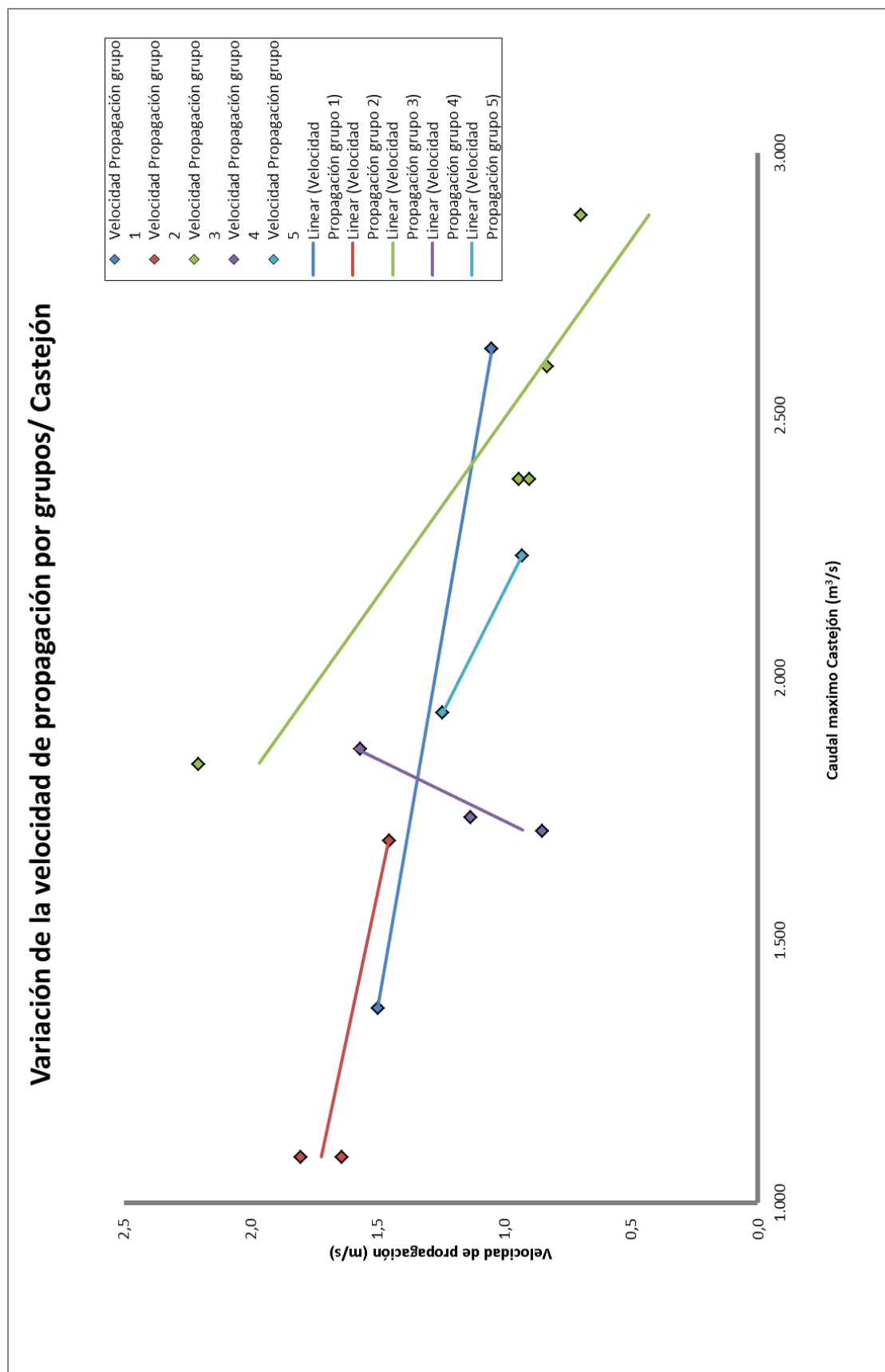


Figura 57: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del parámetro K del modelo de Muskingum, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Castejón a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

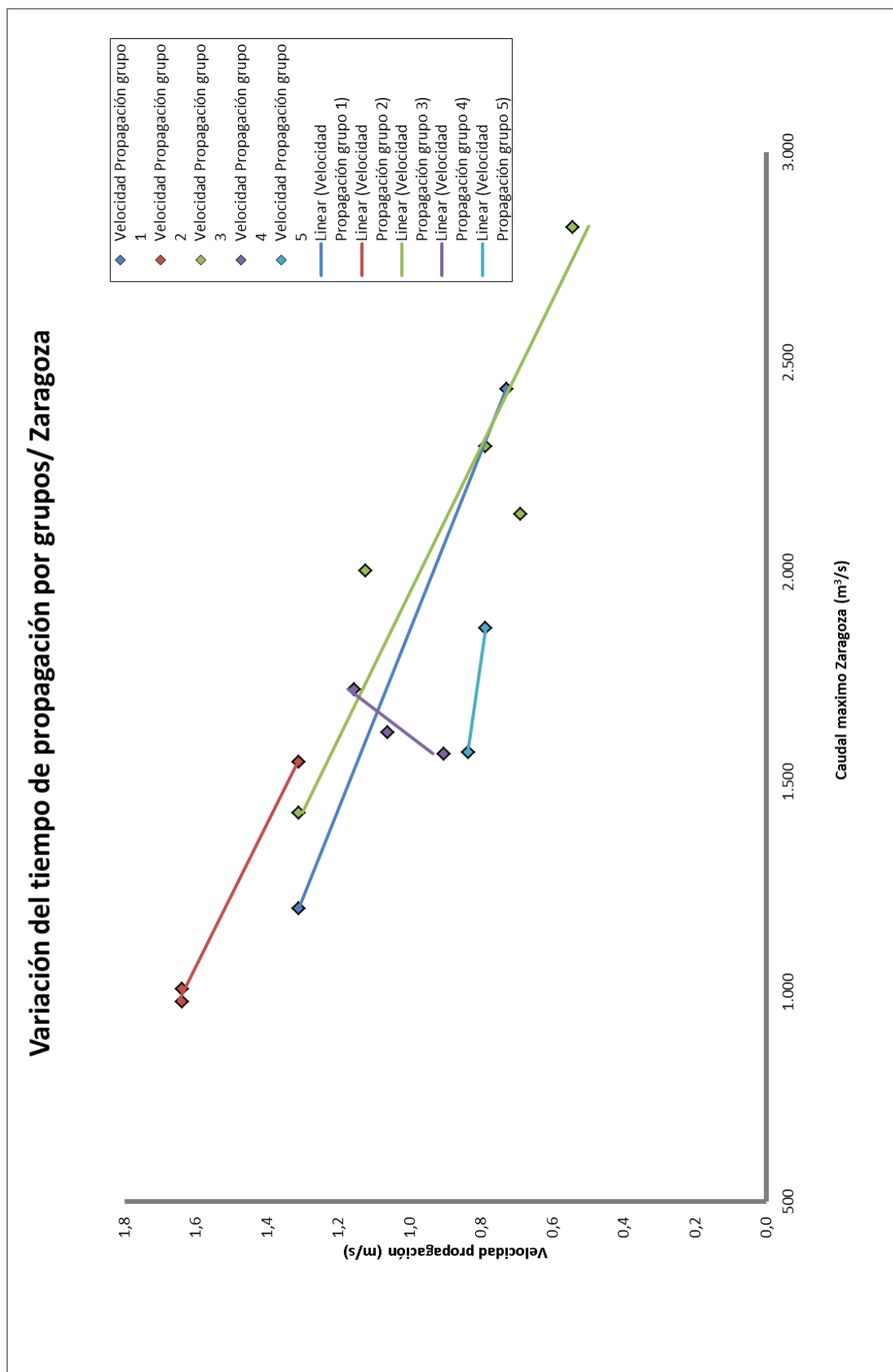


Figura 58: Gráfico que muestra la variación de la velocidad de propagación de una avenida, obtenida a partir del parámetro K del método de Muskingum, en función del caudal máximo observado en las estación de aforo de Zaragoza a partir de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

De la misma forma que ha sido imposible encontrar una relación “lógica” o que represente el significado físico del parámetro X del método de Muskingum, entre dicho parámetro y los caudales picos observados en ambas estaciones o de la atenuación del caudal pico, además de otros parámetros propuestos para representar el fenómeno de la laminación, para todas las avenidas en conjunto, tampoco lo ha sido analizando por separado los diferentes grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable por separado.

En particular se ha analizado la variación del parámetro X del método de Muskingum respecto el caudal máximo medido en Castejón (Figura 59), de aquellas avenidas que, dentro de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza, no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables.

Además, también se ha examinado la variación del parámetro X del método de Muskingum respecto la reducción de caudal máximo (Figura 60), de aquellas avenidas que, dentro de las avenidas seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza, no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables.

En ambos casos, y como se ha mencionado anteriormente, no se ha podido observar ninguna tendencia de forma generalizada o por grupos, y si se pudiera (como por ejemplo en el grupo 3 de la Figura 60, se observa una relación decreciente entre el valor del parámetro X y la reducción de caudal punta), no son suficientemente representativos como para poder descartar que sean fruto de la coincidencia.

Como se ha explicado antes cuando se ha analizado el comportamiento en general del parámetro X, los motivos que hacen imposible analizar o validar la interpretación física del parámetro X son varios, incluyendo los aportes externos de caudal que, aunque sólo sean notables en algunos casos, pero presentes en todas las avenidas y la falta de consistencia para poder correlacionar de manera más precisa el valor del parámetro X con el fenómeno de la laminación.

Además, también cabe destacar que en ambas figuras (Figura 59 y Figura 60), los valores de X se agrupan principalmente en dos grupos, valores de X que si sitúan entre 0,4 y 0,5 y aquellos que lo hace entre 0,05 y 0,2, lo que da a entender que el ajuste del parámetro X es muy sensible a la laminación (si es que existe relación entre ambos, que no se ha podido demostrar en este estudio), de manera que hay una ausencia de valores del parámetro X entre 0,2 y 0,4, lo que a priori da a entender que los valores del parámetro X obtenidos corresponden a avenidas con un fuerte fenómeno de la laminación, o bien, casi inexistente.

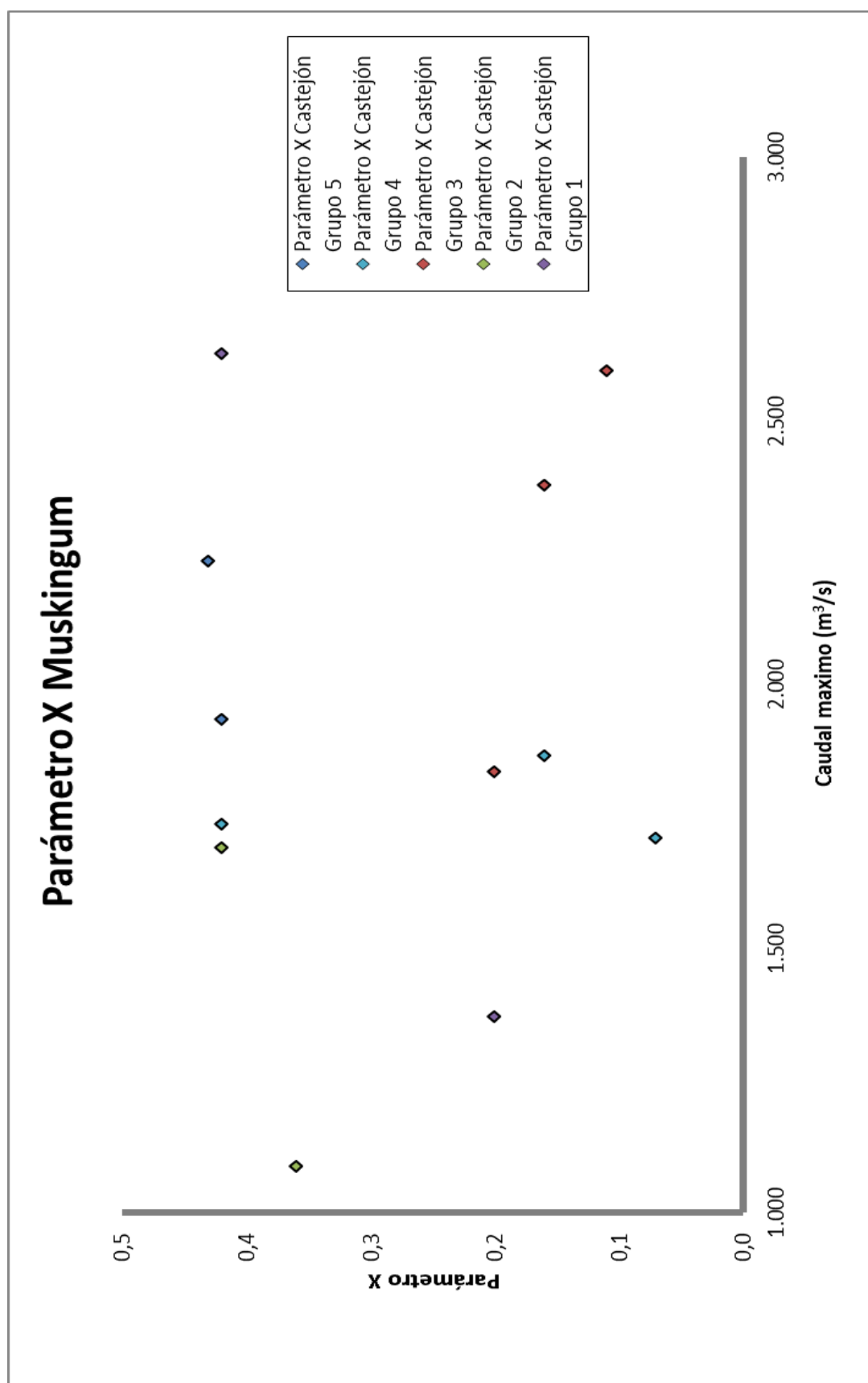


Figura 59: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función del caudal máximo observado en las estaciones de aforo de Castejón a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

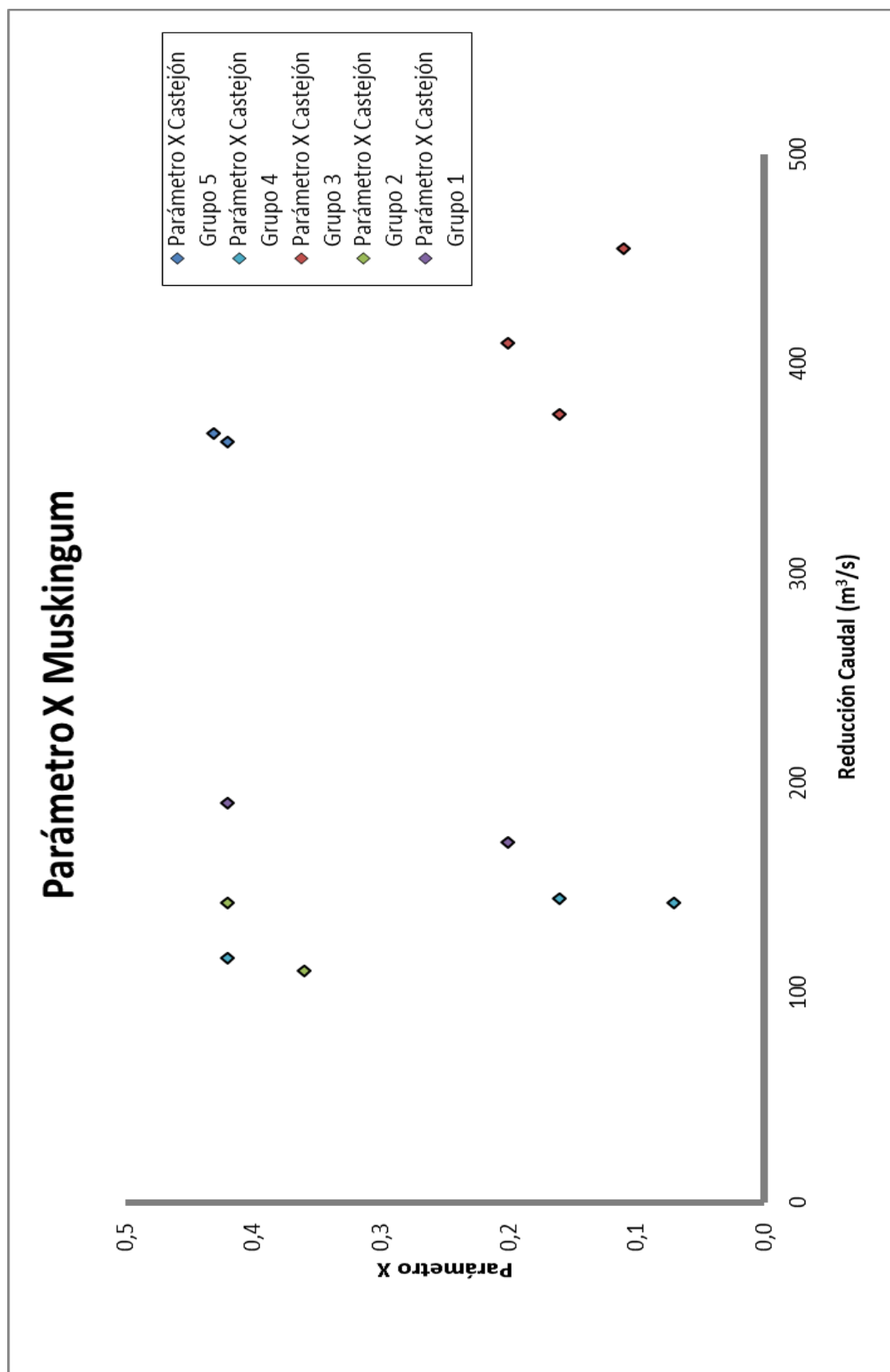


Figura 60: Gráfico que muestra la variación del parámetro X del método de Muskingum en función de la reducción de caudal máximo a partir de las avenidas, seleccionadas para analizar la evolución temporal de la propagación de las avenidas en el tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro, que no sean susceptibles de haber recibido aportaciones de caudal no despreciables y agrupadas por los grupos de avenidas en los cuales se observa una relación de niveles del río en las estaciones de Castejón y Zaragoza estable.

6. CONCLUSIONES

Una vez analizado el estudio de la evolución temporal los parámetros representativos de la manera en que se propagan las avenidas de algunas de las avenidas incluidas en el "Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón", para el tramo del río Ebro de Castejón-Zaragoza, se han podido extraer varias conclusiones así como comprobar algunas de las hipótesis formuladas, a partir del análisis teórico de la propagación de las avenidas, respecto al comportamiento de algunos de los parámetros característicos de las avenidas y de los parámetros K y X del método de Muskingum.

En relación a estas hipótesis, se ha demostrado que, como era de esperar:

- El caudal máximo observado en la estación de Zaragoza depende directamente del observado en Castejón, de manera que la tendencia general, a pesar de los posibles aportes externos de caudal, incluyendo aportaciones de afluentes o precipitaciones, corresponde a que el caudal observado en Zaragoza sea menor que el observado en Castejón, poniendo de manifiesto el fenómeno de la laminación en las avenidas.
- La atenuación del caudal punta que se observa entre el caudal pico en Castejón y Zaragoza, a pesar de la dispersión y variabilidad de los resultados inherentes en la propia relación, aumenta a medida que lo hace la magnitud de la avenida (medible mediante el caudal pico observado en ambas estaciones de aforo).
- El tiempo de propagación de las avenidas aumenta a medida que lo hace la magnitud de éstas, lo que pone de manifiesto que, a medida que se incrementa la magnitud de una avenida, una mayor proporción del caudal pasa a circular, con una velocidad menor, por las llanuras de inundación.
- La velocidad de propagación de las avenidas disminuye a medida que aumenta la magnitud de las avenidas, que atiende al mismo fenómeno de antes: a medida que se incrementa la magnitud de una avenida, una mayor proporción del caudal pasa a circular, con una velocidad menor, por las llanuras de inundación, de manera que la velocidad de la avenida, en conjunto, disminuye. Además, este resultado es coherente con el hecho que la velocidad de propagación de una avenida depende inversamente de su tiempo de propagación.

En referencia a los parámetros K y X del método de Muskingum:

- El parámetro K del método de Muskingum de las avenidas tiende a aumentar a medida que lo hace la magnitud de la avenida, lo concuerda con lo esperado, teniendo en consideración la interpretación física del parámetro K del método de Muskingum, según la cual, éste corresponde al tiempo de propagación de la avenida.
- El parámetro X del método de Muskingum no guarda una relación decreciente con la atenuación del caudal pico de una avenida, y, por relación entre la atenuación y la magnitud de una avenida, tampoco la guarda con la magnitud de una avenida. La dispersión de los datos impide encontrar ninguna relación entre el parámetro X y la atenuación del caudal pico de la avenida u otros parámetros representativos de la laminación de las avenidas, ni tampoco entre el parámetro X y la magnitud de la avenida.

Finalmente, en cuanto a la evolución temporal de la velocidad y tiempo de propagación de las avenidas juntamente con la de los parámetros del método de Muskingum:

- Para los grupos de avenidas que corresponden a mayores niveles de acumulación de sedimentos, a pesar de algún valor anómalo que pueda indicar lo contrario o un grupo de avenidas que tenga un comportamiento diferenciado del resto, se observan mayores valores del tiempo de propagación de las avenidas así como del parámetro K del método de Muskingum para un mismo caudal, lo que se corresponde con el paralelismo entre ambos y a las predicciones hechas.
- Para los grupos de avenidas que corresponden a mayores niveles de acumulación de sedimentos, a pesar de algún valor anómalo que pueda indicar lo contrario o un grupo de avenidas que tenga un comportamiento diferenciado del resto, se observan menores valores de la velocidad de propagación de las avenidas para un mismo caudal.
- Del mismo modo que no se ha podido encontrar una relación suficientemente consistente entre el parámetro X y la magnitud de las avenidas o parámetros representativos de la laminación de las avenidas para todas ellas en conjunto, tampoco lo ha sido para cada grupo por separado. En consecuencia, no se pueden comparar los valores del parámetro X de cada grupo debido a la dispersión de los datos, ya que, cualquier comportamiento que se pudiera observar, carecería de sentido físico.

El fracaso a la hora de estimar el comportamiento del parámetro X puede tener diferentes porqués. En primer lugar, la escasez de bibliografía que estudie, de forma analítica y precisa, la relación entre el parámetro X y el fenómeno de la laminación, puede haber desembocado en una interpretación errónea del significado físico del parámetro X y por lo tanto, en unas hipótesis sin fundamento.

Otros motivos que, según mi punto de vista, pueden ser más probables, incluyen:

- Las diferentes características de los datos utilizados, en función de su origen, para ajustar los parámetros del método de Muskingum. Por ejemplo, los datos proporcionados por el SAIH proporcionan valores del caudal cada 15 minutos, mientras que los que se han obtenido a partir de la digitalización de limnigramas documentados en papel son cada 6 horas.
- Considerar despreciables los aportes externos de caudal en la mayoría de los casos, a pesar de que no se consideraron las avenidas donde el caudal pico en Zaragoza era mayor que el observado en Castejón, además de analizarse con especial detenimiento aquellas avenidas en las que la atenuación del caudal pico era prácticamente nulo. Estos aportes de caudal, sin embargo, harían variar la magnitud de la avenida en su paso en Zaragoza, pero no suponen un motivo por el cual los valores del parámetro X no se correspondieran con los esperados, dada la interpretación física del parámetro X.
- El método de Muskingum prioriza la obtención de la mejor estimación posible para el hidrograma en un cierto punto a partir del hidrograma en un punto aguas arriba. Es posible que, en la calibración de los parámetros K y X, se pierdan el significado físico de los propios al priorizarse la obtención de una estimación lo más exacta posible.

Algunas alternativas o métodos de trabajo que supondrían mejorar los resultados podrían ser, en primer lugar, tener en consideración de alguna manera el caudal lateral que recibe el río Ebro durante el tramo Castejón-Zaragoza, que en la mayoría de avenidas se ha considerado despreciable, por ejemplo, utilizando métodos de propagación de avenidas que sí consideran el flujo lateral, como por ejemplo el método de Muskingum triparamétrico que incorpora el caudal lateral.

Otra opción consistiría en considerar la posibilidad de utilizar otros métodos de propagación de avenidas que, a priori, son más exactos que el método de Muskingum, como por ejemplo el de Muskingum-Cunge, derivado y más preciso que el anterior. Sin embargo, es posible que algunos de estos métodos requieran datos adicionales que, quizás, no se dispongan ni se puedan obtener fácilmente.

Otra línea de estudio interesante sería, una vez analizado el desarrollo de las avenidas en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza (es decir, analizar por ejemplo en que tramos normalmente se producen las mayores inundaciones y se ralentiza la propagación de la avenida, en que tramos sucede lo contrario, etc.), subdividir el tramo de análisis Castejón-Zaragoza para poder analizar como varían los parámetros del método de Muskingum en función del comportamiento (mayor o menor superficie inundada, ralentización de la avenida, etc.) que tiene la avenida en cada tramo. No obstante, a pesar de que actualmente existen varias estaciones de aforo en el tramo Castejón-Zaragoza, como por ejemplo en Tudela o Novillas, la mayoría de estas estaciones son muy recientes, de manera que actualmente no se dispondrían de suficientes datos para llevar a cabo este estudio. Sin embargo, puede ser una interesante línea de estudio en el futuro.

Como conclusión general y más significativa, la evolución temporal del parámetro K del método de Muskingum así como del tiempo de propagación de las avenidas, señalan que, el aumento de fondo que se ha venido observando en Castejón fruto del desequilibrio en el transporte de sedimentos, influye en el comportamiento y desarrollo de las avenidas, de manera que, a medida que aumenta la deposición de sedimentos y se incrementa el nivel del fondo del río a lo largo de una parte del tramo Castejón-Zaragoza, las avenidas desbordan ocupando una mayor superficie de la llanura de inundación, lo que se refleja en el aumento del tiempo de propagación de las avenidas.

El aumento de la magnitud de las inundaciones que puedan generar las avenidas, como es lógico, generará un aumento de los daños producidos por dichas inundaciones. Por lo tanto, sin indicios de que este desequilibrio en el transporte de sedimentos, que es el causante del incremento del nivel del fondo del río, vaya a desaparecer y revertirse a corto plazo, sería conveniente que la Confederación hidrográfica del río Ebro estudiase esta situación para poder frenar el aumento de la deposición de sedimentos que comporta el progresivo incremento del nivel del fondo del río y, en consecuencia, el aumento de la magnitud de las inundaciones generadas por las inundaciones que se producen en el tramo medio del río Ebro.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Colectivo de Educación Ambiental. *El Ebro y sus riberas*. Primera edición. Zaragoza. Ayuntamiento de Zaragoza. Página 26, 2000.
- [2] Confederación hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Descripción de la cuenca. (Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2001&idMenu=2004>)
- [3] SAIH Ebro. Confederación Hidrográfica del Ebro. El SAIH Ebro. Introducción. (Disponible en: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/presentacion/introduccion>)
- [4] Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Descripción de la cuenca. Datos Básicos. (Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2745&idMenu=2167>)
- [5] Anuario de aforos. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Estaciones de aforo: Datos de estación foronómica Castejón. (Disponible en: <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9002>)
- [6] Anuario de aforos. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Estaciones de aforo: Datos de estación foronómica Zaragoza. (Disponible en: <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9011>)
- [7] MARTÍN VIDE, J. P. Ingeniería de ríos. Barcelona. Edicions UPC. 2002.
- [8] VALLARINO, E. Tratado básico de presas. Cuarta Edición. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1998.
- [9] FERRER CASTILLO, C. Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón. Zaragoza. Área de Hidrología y Cauces, Confederación Hidrográfica del Ebro. 2013.
- [10] Colectivo de Educación Ambiental. *El Ebro y sus riberas*. Primera edición. Zaragoza. Ayuntamiento de Zaragoza. Página 10, 2000.
- [11] Gran Enciclopedia Aragonesa. El periódico de Aragón. Refranes geográficos. (Disponible en: http://www.enciclopedia-aragonesa.com/voz.asp?voz_id=10722)
- [12] Confederación Hidrográfica del Ebro. Plan hidrológico del eje del río Ebro desde Miranda de Ebro hasta la cola del embalse de Mequinenza. Borrador. Madrid. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2008.
- [13] BEDIENT, B.P.; W.C. HUBER; B.E. VIEUX. Hydrology and floodplain analysis. Cuarta edición. Upper Saddle River, NJ, EEUU. Prentice Hall. 2008..
- [14] US Geological Survey. Frequently Asked Questions - The Hydrology of Floods. (Disponible en: md.water.usgs.gov/faq/floods.html)
- [15] DOLZ RIPOLLÉS, J. Propagación de avenidas. Métodos de cálculo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya.

- [16] NANÍA ESCOBAR, L.S. Ingeniería Hidrológica. Segunda edición. Granada, España. Grupo Editorial Universitario. 2006.
- [17] PERUMAL, M. A historical perspective of the muskingum method interpretations. Florisa Melone Memorial Conference. IRPI. 2013.
- [18] CHOW, V.T.; D.R. MAIDMENT; L.W. MAYS. Applied hydrology. Primera edición. McGraw-Hill. 1988.
- [19] TEWOLDE, M.H.. Flood routing in ungauged catchments using Muskingum methods. Pietermaritzburg. School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology. University of KwaZulu-Natal. 2005.
- [20] VIESSMAN, W.; G.L. LEWIS; J.W. KNAPP. Introduction to Hydrology. New York, USA. Harper and Row. 1989.
- [21] XIAOFANG, R; L. FANGGUI; Y. MEI. Discussion of Muskingum method parameter X. Water Science and Engineering, Vol. 1, No. 3: 16-23. 2008.
- [22] Elbashir, S. Flood Routing in Natural Channels Using Muskingum Methods. Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the DIT's Master of Engineering Computation. 2011.
- [23] PERUMAL, M. Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. Verification. Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques, 39: 443-458. 1994.
- [24] Confederación hidrográfica del Ebro. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. La cuenca. Información hidrológica. Redes hidrológicas. ROEA. (Disponible en: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2221&idMenu=2188>)
- [25] FANLO, G. Análisis del tránsito de avenidas del Ebro entre Castejón y Zaragoza. Proyecto final de postgrado en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Zaragoza. Universidad de Zaragoza. 2006.
- [26] OLLERO, A.; D. BALLARÍN; D. MORA. Informe sobre el incremento del nivel de las avenidas del río Ebro aguas abajo de la desembocadura del río Aragón. Geographicalia, vol. 50, p. 87-109. 2006.
- [27] KARAHAN, H. Predicting Muskingum flood routing parameters using spreadsheets. Department of Civil Engineering, Pamukkale University, Turkey. 2009.
- [28] Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Anuario de aforos de la estación del río Ebro en Miranda de Ebro. (Disponible en: http://sig.magrama.es/93/CienteWS/GISROEA/default.aspx?nombre=ROAN_ESTACION_AFORO_RIOS&claves=COD_HIDRO|COD_SITUACION_ESTACION&valores=9001|4)
- [29] Gobierno de Navarra. Alternativas de actuación frente avenidas en el río Ebro en Fontellas, Cabanillas, Fustiñana, Ribaforada y Buñuel. 2009. (Disponible en: <http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/148/218/dinamicafluvialebro.pdf>)
- [30] Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Anuario de aforos de la estación del río Arga en Funes. (Disponible en: http://sig.magrama.es/93/CienteWS/GISROEA/default.aspx?nombre=ROAN_ESTACION_AFORO_RIOS&claves=COD_HIDRO|COD_SITUACION_ESTACION&valores=9004|4)

[31] Anuarios de aforos. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Anuario de aforos de la estación del río Aragón en Caparroso. (Disponible en: http://sig.magrama.es/93/ClienteWS/GISROEA/default.aspx?nombre=ROAN_ESTACION_AFORO_RIOS&claves=COD_HIDRO|COD_SITUACION_ESTACION&valores=9005|4)